# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ГОСТЕХИЗДАТ УССР

И. М. ПОСТНИКОВ

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов энергетических специальностей высших учебных заведений СССР*

*Второе издание, переработанное и дополненное*



Государственное издательство
***технической литературы УССР***
Киев — 1960

В книге дана методология и методика основных расчетов при проектировании всех основных и некоторых специальных типов электрических машин и трансформаторов. Во втором издании книги дан ряд новых расчетных методов и увеличено число примеров расчета. Более подробно разработаны экономические вопросы проектирования, вопросы тепловых и вентиляционных расчетов с включением методики расчета закрытых машин при воздушном и водяном охлаждении, механические расчеты с учетом технологических проблем.

Книга рассчитана на студентов политехнических и энергетических вузов как пособие по курсу «Проектирование электрических машин», по курсовому и дипломному проектированию. Вместе с тем, книга может служить руководством для инженеров-электриков, работающих в промышленности.

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Настоящее издание полностью переработано с целью создать учебное пособие по курсу «Проектирование электрических машин», удовлетворяющее современным требованиям использования научных достижений и передового заводского опыта. Учебное пособие содержит методологию и методику проектирования всех основных типов электрических машин и примеры применения этой методики с тем, чтобы студент мог пользоваться книгой не только для изучения курса, но и как пособием при курсовом и дипломном проектировании.

Настоящая книга может служить пособием для практической работы в промышленности и в проектных организациях.

Во втором издании более подробно развит раздел экономических проблем проектирования, а также общие разделы: параметры машин, основные и добавочные потери, нагрев и вентиляция, раздел механических расчетов с учетом технологических проблем. Число примеров увеличено. Даны методика и примеры расчета нагрева закрытых машин при воздушном и водяном охлаждении, даны таблицы основных и обмоточных данных построенных машин, включены вопросы форсированного и внутреннего охлаждения машин.

В составлении примеров по машинам постоянного тока и в разработке методики расчета этих машин принимали участие инж. Харьковского электромеханического завода (ХЭМЗ) М. Н. Курочкин и канд. техн. наук Ю. А. Прокофьев, по примерам расчета синхронных машин — инж. А. И. Вишникин, асинхронных машин — канд. техн. наук Ф. А. Берток, по разделу «Нагрев и вентиляция» — инж. Ю. С. Иванов и инж. Г. Г. Счастливый, по трансформаторам — канд. техн. наук А. В. Новиков. Всем упомянутым лицам автор приносит глубокую благодарность. Пожелания и отзывы просим направлять по адресу: Киев, Пушкинская, 28, Гостехиздат УССР.

*Автор*

## ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия находит все более широкое применение в промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте, в быту и т. д. В любой отрасли промышленности электрическая энергия является не только основным средством энергоснабжения, но и (что особенно важно) крупнейшим фактором технического прогресса. Остановимся на некоторых примерах.

Металлургия достигла высокого технического уровня именно на базе применения электротехники, в частности электрических машин, являющихся самым важным и массовым элементом электроустановок. Доменные и мартеновские печи, конверторы, прокатные и транспортные механизмы металлургических заводов обслуживаются теперь электрическими машинами широкого диапазона мощностей с полностью автоматизированным управлением. Современные сверхмощные реверсивные прокатные станы приводятся в движение двигателями постоянного тока мощностью до 10 000 *квт* и управляются одним человеком.

Наиболее быстрое и решающее развитие химического производства стало возможным в результате применения электрических машин (синхронных и асинхронных машин мощностью до 10 000 *квт* в единице) для привода крупных компрессорных установок и специальных машин постоянного тока с силой тока несколько десятков тысяч ампер для целей электролиза и т. д.

Угольная промышленность получила современное развитие благодаря применению электробуровых двигателей, электровозной откатки, электрифицированного шахтного подъема и, наконец, угольных комбайнов, оборудованных электрическими двигателями специального исполнения.

Высокая экономическая выгодность и удобство эксплуатации обусловили важную роль применения электрических машин для транспорта (электровозы, трамваи, троллейбусы, электробусы). Широкая электрификация промышленного надземного и подземного транспорта, а также электрификация городских и магистральных дорог потребовали значительного расширения производства различных типов тяговых электромашин, удовлетворяющих ряду специфических требований транспорта.

Массовое применение электрических машин для привода производственных механизмов в промышленности и сельском хозяйстве становится все более повсеместным. Электропривод теперь все чаще выполняет роль не только источника механической энергии, но и роль органа управления и регулирования механизмов, что обусловливает повышение производительности и качества продукта производства. Широкое применение электропривода в промышленности облегчает труд рабочих. Около 70% производимой электрической энергии превращается в механическую работу. Если считать, что механическая мощность взрослого человека в среднем составляет 50 *вт*, то, учитывая число людей, занятых физическим трудом в промышленности нашей страны, и масштабы производства электроэнергии в настоящее время, можно прийти к выводу, что каждый рабочий получает в среднем 16-кратное увеличение своей мускульной силы. В действительности, здесь речь идет не только о количественном возрастании, но также (и главным образом) о качественной стороне дела, так как существуют такие производственные процессы, которые принципиально не могут быть выполнены ручным человеческим трудом.

Для покрытия растущей потребности в электроэнергии непрерывно возрастает ее производство. Основное количество энергии генерируется на паровых электростанциях Союза. За годы советской власти построены крупнейшие паровые станции — Шатурская, Дубровская, Сталиногорская и др., оборудованные турбогенераторами мощностью до 200 000 *квт* в единице.

Широкое строительство таких гидростанций, как Днепрогэс, Фархадгэс, Рионгэс, Угличская, Щербаковская, Каховская, Куйбышевская, Сталинградская, Братская ГЭС и др., привело к развитию крупного гидрогенераторостроения.

На отечественных заводах построены крупнейшие в мире гидрогенераторы мощностью 70 000, 90 000, 123 500 *ква* в единице.

Передача энергии от источников к местам ее потребления требует создания трансформаторов. Советское трансформаторостроение получило широкое развитие. Построены трансформаторы мощностью 123 000 *ква* и выше напряжением до 500 000 *в*.

В настоящее время перед нашей электротехнической промышленностью стоит задача создания новых образцов электрических машин, совершенных в эксплуатации и дешевых по стоимости, создания специальных типов высокоскоростных, высокочастотных машин, а также ряда специализированных, автоматически регулируемых электроприводов.

Особенно существенной является задача комплексных решений при проектировании, т. е. решений, учитывающих смежные области техники. Так, выбор параметров генераторов должен быть произведен с учетом устойчивости электрической системы дальней передачи и с учетом особенностей систем регулирования напряжения, выбор параметров двигателей — с учетом автоматических устройств. Должны быть внедрены новые материалы и новые методы технологии производства.



Решение этих задач возможно только при наличии кадров вооруженных глубокими техническими и политическими знаниями, обладающих большой творческой фантазией и способных к смелым техническим решениям.

В предлагаемом курсе перед учащимися стоит задача — научиться творчески применять на практике полученные знания в области физики, математики, электротехники и электрических машин, овладеть основами теории и практики в области расчета и проектирования машин.

Книга разделяется на два основных раздела: первый, состоящий из восьми глав, посвящен общим законам проектирования электрических машин, в частности, вопросам экономики проектирования и основным вопросам теории и расчета. В этих главах рассмотрены вопросы, общие для всех машин, с указанием лишь некоторых специфических моментов для машин различных типов. Во втором разделе дана методика проектирования и примеры расчетов основных видов электрических машин и трансформаторов. При этом рассмотрены примеры проектирования трансформаторов, синхронных и асинхронных двигателей, гидрогенераторов, турбогенераторов и машин постоянного тока.

Особенности изложения материала в данной книге состоят в следующем:

1. Автор стремился к достижению единства методики проектирования всех типов машин. Вместе с тем, каждая глава книги имеет самостоятельный характер и при первом чтении может быть изучаема независимо от других;

2. Главы 1—8, а также часть глав 9—12, посвященная обоснованиям методики расчетов, содержат в совокупности материал для лекций по курсу «Проектирование электрических машин» в соответствии с программой.

Отдельные вопросы выделяются для самостоятельной проработки и дальнейшего исследования.

3. Изучение материала первых двух глав предполагается в два приема: а) вначале чтения курса краткое ознакомление с основными понятиями экономических проблем в электромашиностроении и б) в конце более подробное исследование, основанное на опыте проектирования машин различных типов.

Все расчеты произведены в единой (практической) системе единиц (табл. 1). Единая система написания формул дает огромные преимущества в смысле простоты их понимания и возможного анализа. При этом, если нет особой оговорки, то в формулах все размеры приведены в сантиметрах, мощность — в ваттах, скорость — в об/сек, индукция — в веберах на *см*², потоки — в веберах. Исключение сделано для единиц силы и механических напряжений — *кг*, *кг/см*² вместо *дж/см*, *дж/см*³, как более привычных. В числовых подсчетах, когда это удобно, употребляются различные единицы (*мм*, *м*, гауссы, об/мин и пр.). В расчетах всех машин переменного тока, в том числе и асинхронных двигателей, широко применяется относительная система единиц. При этом обозначения отно-

сительных величин оставлены такими же, как и абсолютных. Во избежание смешивания там, где эти величины встречаются вместе, относительные значения набраны жирным шрифтом. В книге мелким шрифтом дан дополнительный материал для самостоятельной проработки и примеры расчетов.

*Таблица 1*

**Системы единиц**

| Наименование | Обозначение | Практическая рационализованная система | Система MKS$\mu_0$ | Электромагнитная система |
|---|---|---|---|---|
| Длина . . . . . . . . . . . | $l$, $L$ | *см* | *м* | *см* |
| Время . . . . . . . . . . . | $t$ | сек. | сек. | сек. |
| Электрический заряд . . . | $Q$, $q$ | *к* | *к* | э. м. е. (10 *к*) |
| Магнитный поток . . . . . | $\Phi$ | *вб* | *вб* | *мкс* ($10^{-8}$*вб*) |
| Энергия . . . . . . . . . | $A$ | *дж* | *дж* | *эрг* ($10^{-7}$ *дж*) |
| Мощность . . . . . . . . . | $P$, $p$ | *вт* | *вт* | *эрг/сек* |
| Механическая сила . . . . | $F$ | *дж/см* | *дж/м* | *дн* |
| Масса . . . . . . . . . . | $m$ | *дж*(*сек/см*)$^2$ = $10^4$ *кг* | *кг* | *г* |
| Электрический ток . . . . | $I$, $i$ | *а* | *а* | э. м. е. (10 *а*) |
| М. д. с. . . . . . . . . . | $F$ | *а* | *а* | э. м. е. (10 *а*) |
| Электрическое напряжение | $U$ | *в* | *в* | э. м. е. ($10^{-8}$ *в*) |
| Напряженность магнитного поля . . . . . . . . . . | $H$ | *а/см* | *а/м* | *э* (0,4$\pi$*а/см*) |
| Магнитная индукция . . . | $B$ | *вб/см*$^2$ | *вб/м*$^2$ | *гс* |
| Электрическое сопротивление . . . . . . . . . . | $R$, $r$ | *ом* | *ом* | э. м. е. ($10^{-9}$ *ом*) |
| Самоиндукция . . . . . . | $L$ | *гн* | *гн* | *см* ($10^{-9}$ *гн*) |
| Взаимоиндукция . . . . . | $M$ | *гн* | *гн* | *см* ($10^{-9}$ *гн*) |
| Электропроводимость . . . | $\gamma$ [$\sigma$] | *с* | *с* | э. м. е. ($10^9$ *с*) |
| Электроемкость . . . . . . | $C$ | *ф* | *ф* | *см* ($10^{-9}$ *ф*) |
| Магнитная проницаемость пустоты . . . . . . . . | $\mu_0$ | $0{,}4\pi\cdot10^{-8}$ *гн/см* | $0{,}4\pi\cdot10^{-6}$ *гн/м* | 1 |
| Относительная магнитная проницаемость . . . . . | $\mu'$ | Безразмерная | Безразмерная | Безразмерная |
| Диэлектрическая проницаемость пустоты . . . . . | $\varepsilon_0$ | $\frac{10^{-11}}{36\pi}$ *ф/см* | $\frac{10^{-9}}{36\pi}$ *ф/м* | $1/c^2$ ($c = 3\cdot10^{10}$*см/сек*) |
| Напряженность электрического поля . . . . . . . | $E$ | *в/см* | *в/м* | э. м. е./*см* |

**Условные обозначения**

$A$ — линейная нагрузка

$A$ — постоянная распространения температурного поля

$A_R$ — линейная нагрузка ротора

$A_N$ — номинальная линейная нагрузка

$a$ — число пар параллельных ветвей в машинах постоянного тока

$a$ — число параллельных ветвей на фазу в машинах переменного тока

$a_1$ — число пар параллельных ветвей в одной из двух составляющих лягушечьей обмотки

$B$ — среднеквадратичная индукция в зубцах

$B_\delta$ — максимум действительной индукции в воздушном зазоре

$B_{\delta_1}$ — амплитуда основной гармонической индукции в зазоре



$B_{\delta_{\text{ср}}}$ — средняя индукция в зазоре

$B_{\delta\text{к}}$, $B_{\text{к}}$ — индукция под добавочным полюсом

$B_j$ — индукция в ярме

$B_m$ — индукция в полюсах

$B$, $B_z$, $B_{zs}$ — средняя индукция в зубцах статора

$B_{zR}$ — средняя индукция в зубцах ротора

$B_{\text{п}s}$ — индукция пульсаций в зубцах статора

$B_{\text{п}R}$ — индукция пульсаций в зубцах ротора

$B_0$ — индукция зубцовой пульсации

$B$, $B_s$ — индукция в сердечнике трансформатора

$B_\nu$ — действительная нормальная составляющая индукции на поверхности

$B_3$ — индукция третьей гармонической

$b$ — обмотанная часть полюсного деления

$b$ — ширина катушек трансформатора

$b$ — ширина проводника

$b$ — скос паза

$b_m$ — ширина полюса

$b_p$ — ширина полюсного наконечника

$b_{\text{п}}$ — ширина паза

$b_z$ — ширина зубца

$b_0$ — ширина пазового открытия

$b_s$, $b_R$ — ширина вентиляционных каналов статора и ротора

$b_{pi}$ — расчетная ширина полюсного наконечника

$b_1$, $b_2$ — расчетная ширина пазового открытия статора и ротора

$b_1$, $b_2$ — радиальные размеры обмоток в трансформаторах

$b_{\text{к}}$ — ширина катушки

$b_{\text{щ}}$ — ширина щетки

$b_{\text{к. з}}$ — ширина коммутационной зоны

$b_{\text{Cu}}$ — ширина чистой меди обмотки трансформатора

$C$ — растягивающее усилие

$C$ — полная теплоемкость тела

$C_1$ — теплоемкость пусковой клетки

$C_2$ — теплоемкость железа

$C_{\text{A}}$ — машинная постоянная Арнольда

$C_s$ — универсальная машинная постоянная статора

$C_R$ — универсальная машинная постоянная ротора

$C_{\text{т}}$ — постоянная трансформатора

$C'_s$ — постоянная электрической машины

$c$ — удельная теплоемкость

$c$ — коэффициент тепловой связи

$c$ — отношение цен меди и железа

$c$ — высота консоли

$c_{\text{p}}$ — теплоемкость воздуха

$c_p$ — расстояние между полюсными наконечниками

$c_m$ — среднее расстояние между полюсными сердечниками

$c_{\text{Fe}}$ — постоянная потерь в железе

$D$ — диаметр расточки статора или внешний диаметр якоря (при внутренних якорях)

$D$ — диаметр сердечника трансформатора

$D_R$ — диаметр ротора

$D_{\text{л}}$ — диаметр колец успокоительной обмотки и короткозамкнутой клетки

$D_{\text{к}}$ — диаметр коллектора

$D_{j_1}$ — внешний диаметр ярма статора, внутренний диаметр ярма ротора

$D_{j_2}$, $D'_{j_2}$ — диаметры ярма вторичного якоря

$D_{\text{ц. ш}}$ — диаметр окружности центров шариков

$d$ — диаметр стягивающих болтов или шпилек

$d_{\text{ц}}$ — диаметр цапфы

$d_{\text{с}}$ — диаметр стержня успокоительной обмотки

$d_{\text{к}}$ — диаметр канала

$E$ — э. д. с. фазы, действующее значение

$E$ — напряженность электрического поля

$E$ — модуль упругости

$e$ — э. д. с., мгновенное значение

$e$ — основание натуральных логарифмов

$e_{\text{р}}$ — реактивная э. д. с.

$e_w$ — витковое напряжение

$e_k$ — э. д. с. секции от внешнего поля

$F$ — механическая сила

$F$ — отношение стоимости других материалов к стоимости меди

$F_f$ — м. д. с. обмотки возбуждения

$F_1$ — основная гармоника, м. д. с. статора на полюс

$F_1$, $F_2$ — м. д. с. обмоток 1 и 2

$F_\delta$ — м. д. с. на воздушный зазор (на полюс)

$F_z$ — м. д. с. на зубцы (на полюс)

$F_j$ — м. д. с. на ярмо (на полюс)

$F_m$ — м. д. с. на полюсный сердечник

$F_N$ — номинальная м. д. с. трансформатора

$F_s$ — м. д. с. якоря (прямоугольная волна)

$f$ — частота сети

$f_\nu$ — частота гармоник

$f_{\nu R}$ — частота гармоник ротора

$f_z$ — частота зубцовых пульсаций

$F_{\nu m}$ — амплитуда $\nu$-той гармоники м. д. с.

$F_R, F''_L$ — радиальная и осевая силы при коротком замыкании трансформатора

$F_R$ — м. д. с. ротора

$F_h$ — осевая сила при асимметрии обмоток

$f$ — сечение воздухопровода

$f'$ — сечение воздушного зазора под наконечником добавочного полюса

$f''$ — то же, у ярма

$G$ — вес тела

$G$ — вес выемной части

$G_м$ — вес масла

$G_p$ — вес полюсов

$G_R$ — вес ротора

$G_{kd}$ — вес успокоительной (демпферной) клетки

$G_{Cu}$ — вес меди

$G_{Fe}$ — вес железа

$G_z$ — вес зубцов

$G_s$ — вес сердечника

$G_{пр}$ — производный вес

$g$ — ускорение силы тяжести

$g_{Cu\,(Fe)}$ — относительный вес меди (железа) на единицу мощности

$H$ — напряженность магнитного поля

$H_\delta$ — напряженность поля в воздушном зазоре

$H_z$ — напряженность поля в зубцовой зоне

$H_j$ — напряженность поля в ярме

$H_m$ — напряженность поля в полюсе

$H_\nu$ — напряженность поля высших гармонических

$H$ — высота обмотки трансформатора

$H_{Cu}$ — общая высота меди обмотки (в пазу, на полюсе или на сердечнике трансформатора)

$H$ — полный напор

$H_1$ — статическое давление или «статический напор» в точке 1

$H_2$ — статическое давление в точке 2

$H_t$ — теоретический напор

$H_0$ — статический напор при нулевом расходе воздуха

$h$ — высота элементарного проводника

$h_ш$ — высота шины

$h_m$ — высота полюсного сердечника

$h_p$ — высота полюсного башмака

$h_a$, $h_j$ — высота ярма

$h_{j_s}$ — высота спинки ротора

$h_п$ — высота паза

$h_к$ — высота клина

$h_1$ — высота паза до клина

$h_0$ — высота открытия паза

$h_2$ — расстояние между медью двух стержней в пазу

$h_{1,2}$ — потеря напора между точками 1 и 2

$h_v$ — потеря напора в вентиляторе

$H_d$, $h_d$ — динамический напор

$h_s$ — боковой периметр катушки

$I$ — фазный ток, действующее значение

$I_0$ — ток холостого хода

$I$ — экваториальный момент инерции вала

$I_{экв}$ — эквивалентный экваториальный момент инерции вала переменного сечения

$I_p$ — полярный момент инерции вала

$I_0$ — момент инерции вала по среднему сечению

$I_{max}$ — максимальный ток короткого замыкания

$I'_d$ — переходной ток короткого замыкания

$I''_d$ — сверхпереходной ток короткого замыкания

$I_a$ — ток якоря

$i_f$ — ток возбуждения

$J$ — момент инерции массы относительно оси вращения

$J$ — относительный момент инерции

$I_{пр}$ — ток в проводнике

$I_\mu$ — намагничивающий ток

$I_{к_i}$ — идеальный ток короткого замыкания

$I_2$ — вторичный ток

$I_п$ — пусковой ток

$i_a$ — ток в параллельной ветви

$K$ — число коллекторных пластин

$K'$, $K''$ — коэффициенты деформации

$K_A$ — коэффициент использования

$k$ — коэффициент приведения стоимости потерь к стоимости материалов

$k_w$ — коэффициент обмотки

$k_{w\nu}$ — коэффициент обмотки для $\nu$-той гармоники

$k_\varphi$ — полный коэффициент заполнения

$k_п$ — коэффициент проклейки железа

$k_ф$ — коэффициент формы сечения

$k_{c_1}$ — коэффициент Картера статора

$k_{c_2}$ — коэффициент Картера ротора

$k_н$ — коэффициент насыщения

$k'_{ф z}$ — коэффициент увеличения потерь от вихревых токов в зубцах

$k_{jr}$ — коэффициент гистерезисных потерь в ярме

$k_{mr}$ — коэффициент увеличения потерь на гистерезис

$k_{Cu}$, $k_{Fe}$ — коэффициенты потерь в меди и стали

$k'_0$ — постоянная при расчете поверхностных потерь

$k_r$ — средний коэффициент увеличения сопротивления от вихревых токов

$k_m$ — коэффициент объемной реакции от вихревых токов

$k_x$, $k_y$, $k_z$ — коэффициенты теплопроводности в направлении $x$, $y$, $z$

$k_0$ — коэффициент осевой теплопередачи

$k_x$ — коэффициент теплопроводности поперек листов

$k_{zx} = \frac{S_{пx}}{S_{zx}}$ — коэффициент отношения сечения $x$ паза к сечению $x$ зубца

$k_{\nu r}$ — коэффициент реакции для $\nu$-той гармоники

$k_\nu$ — коэффициент пространственного затухания волны для $\nu$-той гармоники

$k_ф$ — коэффициент потока

$k'_л$ — коэффициент обдуваемости лобовых частей

$k_э$ — эффективный коэффициент экранирования

$k$ — кратность тока перегрузки

$k_i$ — коэффициент теплопроводности изоляции

$k$ — жесткость вала

$k_R$ — коэффициент Роговского

$k_{p\nu}$ — коэффициент распределения для $\nu$-той волны

$k_{c\nu}$ — коэффициент скоса для $\nu$-той волны

$k_{Fe}$ — коэффициент теплопроводности железа

$L_1$ — индуктивность первичной обмотки

$L_2$ — индуктивность вторичной обмотки

$L_п$ — индуктивность паза

$L_z, L_j, L_m$ — длина магнитных путей

$L_к$ — длина колец успокоительной обмотки

$L_i$ — оптимальный линейный размер

$l$ — полная длина железа

$l_{Fe}$ — длина чистого железа машины

$l'$ — ширина пакета железа

$l_л$ — длина лобовой части

$l_p$ — длина полюса

$l_c$ — длина стержня успокоительной обмотки

$l_w$ — длина витка

$l_i$ — расчетная длина машины

$l_s$ — высота стержня трансформатора

$l_j$ — длина ярма трансформатора

$l_o$ — ширина окна трансформатора

$l_ц$ — длина цапфы

$l_{si} = H$ — идеальная длина стержня, равная высоте обмотки

$l_m$ — длина полюсного наконечника

$l_{Fe}$ — длина магнитопровода на 1 фазу трансформатора

$l_к$ — длина канала

$M$ — электромагнитный момент

$M_в$ — внешний момент, приложенный к валу двигателя

$M'_N$ — единичный момент машины

$M_т$ — тормозной момент

$M$, $M_{изг}$ — изгибающий момент

$M_п$ — пусковой момент

$M_{вх}$ — входной момент

$M_{max}$ — максимальный момент

$M_m$ — стоимость активных материалов

$M_л$ — стоимость лобовой части

$M_j$ — стоимость ярма

$M_z$ — стоимость зубцов

$M_s$ — стоимость сердечника

$M_p$ — стоимость потерь

$M_{пр}$ — производная стоимость

$M_д$ — действительная приведенная стоимость

$M_{дi}$ — минимальная действительная приведенная стоимость

$M_{mi}$ — стоимость материалов при $M_д = M_{дi}$

$m$ — число фаз

$m_2$ — число фаз ротора

$m$ — число проводников, лежащих в пазу друг над другом

$m$ — число стержней трансформатора

$m_{Fe}$ — стоимость единицы веса железа

$m_{Cu}$ — стоимость единицы веса меди

$m_V$ — стоимость единицы объема проводов

$m_p$ — стоимость единицы электроэнергии

$N$ — число проводников якоря

$N_R$ — число зубцовых делений ротора

$n$ — скорость вращения

$n$ — число слоев обмотки

$n_s$ — число вентиляционных каналов статора

$n_R$ — число вентиляционных каналов ротора

$n_г$ — число рабочих часов в году

$n_к$ — число каналов

$n_л$ — число лопаток вентилятора

$n_c$ — число стержней на полюс

$n_{уг}$ — угонная скорость

$n_{сег}$ — число сегментов

$n_z$ — число пазов на сегмент

$P$ — внешняя мощность

$P_N$ — номинальная мощность

$P_i$ — внутренняя мощность

$P_2$ — полезная мощность

$p$ — число пар полюсов

$p_{Cu}$ — потери в меди

$p_{Fe}$ — потери в железе

$p_z$ — потери в зубцах

$p_{z3}$ — потери от третьей гармонической в зубцах статора

$p_j$ — потери в ярме

$p_s$ — потери в сердечнике

$p_ф$ — потери в стали от вихревых токов

$p_{фz}$ — потери на вихревые токи в зубцах

$p_{гz}$ — потери на гистерезис в зубцах

$p_{гj}$ — потери на гистерезис в ярме

$p_{п_1}$ — пульсационные потери в статоре

$p_{п_2}$ — поверхностные потери в статоре на холостом ходу от зубцовых гармоник ротора

$p_{02}$ — то же, в роторе от зубцовых гармоник статора

$p_{\nu zs}$ — поверхностные потери в статоре от зубцовых гармоник ротора

$p_{\nu zR}$ — поверхностные потери в роторе от зубцовых гармоник статора

$p_{\nu s}$ — поверхностные потери в статоре от высших гармоник ротора

$p_{\nu R}$ — поверхностные потери в роторе от высших гармоник статора

$p_f$ — потери в обмотке возбуждения

$p_{Cu\,п}$ — потери в меди пазов

$p_{Cu\,л}$ — потери в меди лобовой части

$p_1$ — потери в клетке при пуске или торможении

$p_{10}$ — удельные потери при 10 000 *гс* ($1 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*$^2$)

$p_{пр}$ — производные потери



$p_т$ — потери на трение в подшипниках

$p_v$ — вентиляционные потери

$p_m$ — механические потери

$\Sigma' p$ — потери, уносимые воздухом; условные потери

$p'$ — количество тепла, выделяющегося в единице объема

$p_a$ — атмосферное давление

$p_ц$ — удельное давление в цапфе

$p_{пл}$ — потери в нажимных плитах

$p_{п.к}$ — потери в переходном контакте

$p_н$, $p_в$ — равномерно распределенное наружное и внутреннее давление цилиндра

$Q$ — вес ротора

$q$ — сечение меди

$q$ — число пазов на полюс и фазу

$q_ф$ — сечение фазного провода, $q'_ф = \frac{q_ф}{a}$

$q$ — нагрузка на сантиметр длины вала

$q$ — отношение веса на сантиметр к весу на сантиметр центральной части

$q_{Cu\,п}$ — общее сечение меди паза

$q_п$ — общее сечение паза

$q_{Cu}$ — сечение частичного проводника

$R_j$, $R$ — радиус инерции

$R_p$ — радиус очертания полюсного башмака

$R_н$ — радиус станины по нейтральному сечению

$R_1$ — тепловое сопротивление

$R_i$ — тепловое сопротивление изоляции

$R_a$ — тепловое сопротивление при сходе с поверхности

$r$ — активное сопротивление

$r_1$ — сопротивление обмотки статора

$r_2$ — сопротивление обмотки ротора

$S$ — поверхность, обдуваемая воздухом

$S$ — сечение сердечника

$S_{Cu}$ — общее сечение меди обмотки (первичной или вторичной) трансформатора

$S_{Fe}$, $S_s$ — сечение сердечника

$S_к$ — сечение каналов

$S_р$ — сечение выхода воздуха из ротора

$S_R$ — поверхность ротора

$S_к$ — поверхность конвекции бака

$S_л$ — поверхность лучеиспускания бака

$S_к$ — суммарная площадь всех вентиляционных каналов

$S_л$ — обдуваемая поверхность лобовых частей

$S_j$ — поверхность ярма

$S_\delta$ — поверхность расточки якоря

$S_s$ — поверхность радиальных каналов

$s$ — плотность тока

$s_{эк}$ — экономическая плотность тока

$s_N$ — номинальная плотность тока

$s_\nu$ — плотность тока в роторе от ν-той гармоники м. д. с.

$s_п$ — число проводников в пазу в последовательном соединении

$s$ — скольжение

$T$ — постоянная времени нагрева

$T_i$ — постоянная инерции

$T_н$ — время закрывания направляющего аппарата

$T_d$ — постоянная времени обмотки возбуждения

$T'_d$ — постоянная времени переходных токов

$T''_d$ — постоянная времени сверхпереходных токов

$T_a$ — постоянная времени асимметричных токов

$t_1$ — пазовый шаг по расточке статора

$t_2$ — пазовый шаг ротора

$t_h$ — пазовый шаг успокоительной обмотки

$t_1, t_2, t_3, \ldots$ — промежутки времени

$t_п$ — время пуска

$t_1$, $t_2$ — шаг зубца

$t_{к\,min}$ — минимальное коллекторное деление

$U_N$ — номинальное напряжение

$U_2$ — напряжение на кольцах ротора

$U_{f\,max}$ — потолочное напряжение возбудителя

$u_п$, $u$ — число активных сторон в пазу

$u_1$, $u_2$ — окружная скорость лопатки у входа и выхода

$V_{Cu}$ — полный объем меди
$V_{Fe}$ — полный объем железа
$v_f$, $v_s$, $v_л$, $v_\delta$, $v_к$, $u_j$ — скорости воздуха у катушек возбуждения, в каналах, в лобовых частях, в зазоре, в аксиальных каналах, у ярма
$V$ — расход воздуха
$V_1$ — расход воздуха через канал *1*
$V_л$ — расход воздуха через лобовую часть машины
$V_а$ — расход воздуха через активную часть
$v_1$, $v_2$ — абсолютные скорости воздуха у входа и у выхода
$v_2$ — скорость воздуха при выходе из вентилятора
$v_{ка}$ — средняя скорость воздуха в радиальных каналах статора
$v_n$ — скорость в сечении $S_n$
$v$ — окружная скорость
$v_{уг}$ — угонная скорость
$W$ — момент сопротивления
$w$ — число витков на фазу
$w$ — удельный тепловой поток
$w'$ — число витков на фазу, умноженное на обмоточный коэффициент
$w_п = s_п$ — число витков в пазу в последовательном соединении
$w_{Cu}$, $w_{Fe}$, $w_л$ — удельные тепловые потоки от потерь в меди активной части, в железе и в лобовой части
$w_s$ — число витков в секции
$x_f$ — полная реактивность обмотки возбуждения
$x_{fs}$ — реактивность рассеяния обмотки возбуждения
$x_s$ — реактивность рассеяния якоря
$x_d$ — синхронная реактивность в продольной оси
$x_q$ — синхронная реактивность в поперечной оси
$x_m$ — реактивность взаимоиндукции
$x_z$ — реактивность зубцового рассеяния
$x_B$ — реактивность поясового рассеяния
$x_0$ — реактивность нулевого следования
$x_2$ — реактивность обратного следования
$x_d''$ — сверхпереходная реактивность
$x_d'$ — переходная реактивность
$x_{1d}$ — полная реактивность успокоительной обмотки в продольной оси
$x_{kd}$ — реактивность рассеяния успокоительной обмотки в продольной оси
$x_{1q}$ — полная реактивность успокоительной обмотки в поперечной оси
$x_{kq}$ — реактивность рассеяния успокоительной обмотки в поперечной оси
$x_в$ — реактивность рассеяния верхней клетки
$x_н$ — реактивность рассеяния нижней клетки
$x_{п.о}$ — реактивность рассеяния в открытии паза
$y$ — шаг обмотки в долях диаметрального шага
$y$ — координата прогиба вала
$y_п$ — шаг в пазовых делениях
$y_1$, $y_2$ — частичные шаги
$y_к$ — шаг по коллектору или результирующий шаг
$y_у$ — шаг уравнительных соединений
$Z$ — аэродинамическое сопротивление
$Z_в$ — аэродинамическое сопротивление вентилятора
$Z_1$, $Z_2(Z_н)$ — число пазов статора и ротора
$\alpha_i$ — коэффициент расчетной полюсной дуги
$\alpha_s$ — коэффициент теплоотдачи в радиальные каналы
$\alpha_\delta$ — коэффициент теплоотдачи от расточки в зазор
$\alpha_j$ — коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности ярма
$\alpha_л$ — коэффициент теплоотдачи от лобовых частей
$\alpha_f$ — коэффициент теплоотдачи от вращающихся или неподвижных полюсных катушек
$\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи коллектора
$\beta$ — отношение полюсного деления к расчетной длине
$\beta$ — щеточное перекрытие
$\beta$ — ширина меди обмотки трансформатора между охлаждающими поверхностями
$\beta_к$ — толщина коллекторной пластины
$\beta_i$ — толщина изоляции
$\gamma_{Cu}$ — удельный вес меди
$\gamma_{Fe}$ — удельный вес железа
$\gamma$ — оператор $\frac{d}{dt}$
$\gamma_a$ — удельный вес воздуха
$\delta$ — воздушный зазор (минимальный)
$\delta'$ — эффективный воздушный зазор $\delta' = k_c\delta$
$\delta_{max}$ — максимальный воздушный зазор
$\delta_s$ — относительное удлинение
$\delta$ — посадочный натяг
$\Delta$ — двухсторонняя толщина изоляции проводника
$\Delta_i$ — односторонняя толщина пазовой изоляции
$\varepsilon$ — годовая эффективность капиталовложений
$\varepsilon_к$ — напряжение между пластинами коллектора
$\zeta$ — отношение средней ширины зубца к шагу зубца
$\zeta$ — коэффициент аэродинамического сопротивления
$\eta$ — коэффициент полезного действия
$\sigma_s$ — предел упругости при растяжении
$\sigma_s'$ — то же, при изгибе
$\sigma_в$ — предел прочности (временное сопротивление)
$\sigma$ — коэффициент рассеяния
$\sigma_h$ — коэффициент рассеяния добавочных полюсов
$\sigma_w$ — предел усталости при растяжении
$\sigma_w'$ — то же, при изгибе
$\sigma_г$ — постоянная потерь на гистерезис
$\sigma_ф$ — постоянная потерь на вихревые токи
$\theta^0$ — температура, отсчитываемая от нуля градусов
$\theta$ — превышение температуры
$\theta_{Fe}$ — среднее превышение температуры железа
$\theta_a^0$ — температура охлаждающего воздуха
$\theta_{11}$ — превышение температуры поверхности тела *1* от потерь в теле *1*
$\theta$ — установившееся превышение
$\theta_1'$ — условное превышение активной части без учета осевой теплопередачи
$\theta_1''$ — условное превышение лобовой части
$\theta_{б_1}^{\circ}$ — базовая температура входящего воздуха
$\theta_б$ — превышение температуры бака
$\theta_{10}$ — превышение температуры при холостом ходе
$\theta_{1к}$ — превышение температуры при коротком замыкании
$\theta_s$ — превышение температуры поверхности пакета
$\theta_f$ — превышение температуры обмотки возбуждения
$\theta_{Cu}$ — превышение температуры меди
$\theta(t)$ — мгновенное значение превышения температуры
$\Lambda_{12}$, $\Lambda_{21}$ — взаимные тепловые проводимости
$\Lambda_1$, $\Lambda_2$ — собственные тепловые проводимости тел *1* и *2*
$\lambda_п$ — проводимость рассеяния паза
$\lambda_{п.о}$ — проводимость рассеяния пазового открытия
$\lambda_л$ — проводимость рассеяния лобовых частей
$\lambda_к$ — проводимость рассеяния коронок зубцов
$\lambda$ — отношение ширины паза к шагу паза
$\lambda_{2s}$ — проводимость рассеяния обмотки возбуждения
$\lambda_\delta$ — проводимость рассеяния в зазоре
$\lambda_1'$ — податливость наружного диаметра цилиндра от наружного давления
$\lambda_1''$ — податливость внутреннего диаметра от наружного давления
$\lambda_2'$ — податливость наружного диаметра от внутреннего давления
$\lambda_2''$ — податливость внутреннего диаметра от внутреннего давления
$\lambda_2$ — отношение глубины паза к ширине
$\lambda_l$, $\lambda_2$ — проводимости рассеяния на полюс

$\lambda_m$ — проводимость рассеяния между полюсными сердечниками
$\lambda_p$ — проводимость рассеяния между полюсными наконечниками
$\lambda_{fs}$ — магнитная проводимость рассеяния обмотки возбуждения на единицу длины машины
$\mu$ — магнитная проницаемость
$\mu'$ — относительная магнитная проницаемость
$\mu$ — коэффициент трения
$\nu$ — порядок гармонической
$\nu = \nu_z$ — порядок зубцовой гармоники
$\nu = \nu_B$ — порядок поясовой гармоники
$\rho$ — удельное сопротивление
$\rho' = \frac{\rho}{\rho_{Cu}}$ — относительное удельное сопротивление
$\rho'$ — удельное сопротивление с учетом вихревых токов
$\xi$ — отношение потерь в меди к потерям в железе
$\xi$ — приведенная высота проводника
$\xi$ — коэффициент аэродинамического сопротивления
$\xi_j$ — отношение потерь в ярме к потерям в сердечнике
$\xi$ — отношение потерь в меди к потерям в зубцах
$\xi$ — отношение удельной тепловой проводимости изоляции к коэффициенту теплоотдачи
$\tau$ — полюсное деление
$\tau'_s$ — предел упругости при кручении
$\tau'_w$ — предел усталости при кручении
$\varphi$ — угол закручивания вала
$\varphi_{Fe}$ — коэффициент заполнения длины машины сталью
$\varphi_{Cu}$ — коэффициент заполнения паза медью
$\varphi_h$ — коэффициент заполнения высоты обмотки трансформатора медью
$\varphi_b$ — коэффициент заполнения ширины катушки медью
$\psi$ — отношение стоимости железа к стоимости меди
$\psi_\nu$ — потокосцепление $\nu$-той гармоники
$\psi\%$ — относительное сужение
$\psi_j$ — отношение веса ярма к весу сердечника

РАЗДЕЛ I

# МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА

*Глава первая*

## ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 1-1. ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Современный уровень технического развития в области электромашиностроения характеризуется:

а) многообразием областей применения электрических машин и их ведущей ролью в развитии народного хозяйства;

б) многообразием конструктивных форм машин, т. е. развитием специализированных для данной области типов машин;

в) высоким использованием активных и конструктивных материалов машин;

г) высоким уровнем развития теории и методов расчета машин, а также технологии производства.

Несмотря на упомянутое многообразие типов машин, законы построения электрических машин обладают замечательной общностью. Теория работы, методика расчетов, проектирование и технология производства машин достигли такого уровня развития, что могут быть подвергнуты определенным обобщениям и классификации [124].

Подразделение электрических машин может быть произведено по различным принципам и признакам, например: 1) по роду тока: машины постоянного и переменного тока, 2) по общему назначению: генераторы, двигатели и преобразователи, 3) по исполнению: открытые, закрытые, защищенные, герметические и т. д., 4) по конструктивным типам: горизонтальные, вертикальные, наклонные, 5) по применению и т. д.

Далее, может быть проведена **специальная классификация**. Машины **постоянного** тока могут быть разделены по назначению на:

1) крановые и подъемные электродвигатели,

2) тяговые электродвигатели (трамвай, электровоз и т. д.),

3) возбудители турбо- и гидрогенераторов,
4) дизель-генераторы,
5) прокатные двигатели,
6) нормальные серийные генераторы и двигатели,
7) специальные машины (сварочные, электромашинные усилители, регуляторы и т. д.).

Машины переменного тока разделяются на два основных класса:

1. Синхронные машины.
2. Асинхронные машины.

В свою очередь, синхронные машины разделяются на:
1) турбогенераторы,
2) гидрогенераторы,
3) синхронные двигатели и генераторы,
4) синхронные компенсаторы.

По устройству полюсов эти машины разделяются на два типа:
1) неявнополюсные.
2) явнополюсные.

Асинхронные машины используются в подавляющем большинстве случаев как двигатели и разделяются на две основных группы:
1) бесколлекторные (индукционные).
2) коллекторные.

В каждой из этих групп может быть произведена специальная классификация. Так, бесколлекторные (индукционные) машины разделяются прежде всего по устройству ротора на:
а) машины с фазным ротором, или с кольцами (кольчатые),
б) машины с короткозамкнутым ротором (короткозамкнутые).

Как те, так и другие машины могут быть подразделены по ряду иных признаков. Так, короткозамкнутые машины имеют четыре модификации:
1) с нормальным короткозамкнутым ротором (нормальные),
2) с глубокопазным ротором (глубокопазные),
3) с двухклеточным ротором (двухклеточные),
4) с фигурным пазом (фигурнопазные),
5) с массивным ротором (массивнороторные — Шенфера).

Коллекторные машины имеют собственную многочисленную классификацию, например:
1) коллекторные двигатели различных систем,
2) фазокомпенсаторы,
3) коллекторные генераторы различных систем.

Наконец, все машины могут быть разделены:
по мощности на:
1) микромашины — до 0,6 *квт*,
2) мелкие машины — до 1 *квт*,
3) малые машины — до 10 *квт*,
4) средние машины — до 100 *квт*,
5) крупные машины — свыше 100 *квт*;
по напряжению на:
1) низковольтные — до 380 *в*,



2) высоковольтные — свыше 500 *в*;
по быстроходности на:
1) тихоходные — до 250 об/мин,
2) средней скорости — 250 ÷ 1000 об/мин,
3) быстроходные — 1000 ÷ 6000 об/мин,
4) сверхбыстроходные — свыше 6000 об/мин.

## 1-2. ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ И УСЛОВИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Несмотря на разнообразие конструкций и характеристик машин, существуют общие законы и принципы проектирования, охватывающие почти все машины (исключение составляют микромашины, а также некоторые машины, предназначенные для специальных целей, например высокочастотные, сварочные и т. п.).

Хорошо известно также, что современные (нормальные) электрические машины как по принципу действия, так и по конструкции имеют весьма много общего. Но значительно менее известен тот факт, что теория машин и частично расчетные методы могут быть обобщены не только в принципиальном, но и практическом смысле.

В любой электрической машине и трансформаторе имеется магнитопровод, или магнитная система, и по крайней мере две обмотки (первичная и вторичная), связанные общим магнитным потоком *. У электрических машин, как правило, магнитопровод состоит из двух частей, разделенных воздушным зазором. Одна часть магнитопровода входит в состав неподвижной части машины—статора, другая — в состав вращающейся части — ротора. Обе эти части магнитопровода в свою очередь разделяются на две зоны, одна из которых несет на себе обмотку и называется зубцовой, или ядром, другая служит для канализации магнитного потока и называется ярмом.

В трансформаторах первая зона называется сердечником, а вторая — ярмом (иногда сердечником называют обе части, т. е. весь магнитопровод, что неправильно). В электрических машинах, следовательно, имеются две зубцовые зоны (первичная и вторичная) и два ярма (первичное и вторичное). Встречаются термины, заменяющие ярмо: «спинка», «сердечник», «станина» и другие, но их нельзя признать удачными. Распространенным также является термин «якорь» — часть генератора, с которой снимается электрическая мощность или часть двигателя, к которой подводится мощность. Вторая часть машины с этой точки зрения является вспомогательной, так как ее электрическая мощность во много раз меньше. Так в синхронных машинах, машинах постоянного тока и нормальных асинхронных машинах электрическая мощность этой части равна мощности, теряемой в меди обмоток. Эта вторая часть может быть названа вторичным якорем. Имеются, однако, машины двустороннего питания, в которых обе части принципиально одинаковы. Иногда машины, питаемые с ротора, называют «обращенными». Более правильно с этой точки зрения разделять все машины на три

* Имеются параметрические машины с одной обмоткой.

класса: 1) внутриякорные (например машины постоянного тока), 2) внешнеякорные (например нормальные синхронные и асинхронные машины), 3) двойного питания.

По конструктивному типу машины иногда разделяются на внешнеполюсные, в которых явно выраженные полюса находятся во внешней части, и внутриполюсные.

Обмотки и магнитопровод составляют активную часть машины. В конструктивную часть машины входят: а) станина (в машинах постоянного тока станина одновременно служит и вторичным ярмом магнитопровода), б) обод или звезда ротора со спицами (обод часто служит и вторичным ярмом, в мелких же машинах обод и звезда отсутствуют), в) вал, г) подшипниковые щиты или стояки, д) мелкие конструктивные детали.

Особенностью электрической машины по сравнению с другими машинами (например, паровыми или гидравлическими) является, между прочим, следующее обстоятельство. Во всех неэлектрических машинах существует лишь конструктивный вес. Рабочее тело в этих машинах (газ, вода и т. д.) имеет значительный вес, но является посторонним для машины телом. «Рабочим телом» в электрических машинах являются магнитный поток и электрический ток; они невесомы, но требуют для себя: один — тяжелых железных масс, другой — еще более тяжелой меди. Необходимость, кроме конструктивных, также и активных материалов не дает возможности радикально уменьшить вес электрической машины. При уменьшении веса активных материалов плотности тока и потока возрастают, а это ведет к возрастанию потерь и увеличению нагрева машины. Эти условия подробно рассмотрены в гл. 2, а также в примерах расчетов. Предполагается, что читатель усвоил основные принципы действия и теорию работы электрических машин в объеме известных курсов [53, 79, 95]. Поэтому такие вопросы, как диаграммы напряжения, теория обмоток и т. п. рассматриваются лишь в той мере, в какой это необходимо при расчете. Основное внимание обращается на методику проектирования и расчета машин. Однако необходимо обратить внимание читателя, что основной ключ к пониманию и обобщению теории работы машин лежит:

во-первых, в изучении основных уравнений работы электрической машины, выраженных в аналитической или графической форме (диаграммы), а именно: уравнения равновесия э. д. с. в обмотках, уравнения равновесия м. д. с. в магнитной цепи, уравнения равновесия моментов внутренних и внешних сил, действующих на ротор;

во-вторых, в изучении эквивалентных схем машин для установившихся и переходных режимов, а также в изучении геометрических мест тока при изменении режима работы машины;

в-третьих, в изучении методов расчета и опытного определения электрических параметров машин;

в-четвертых, в изучении свойств обмоток электрических машин;

в-пятых, в изучении конструкции и технологии производства машин.



Эти основные вопросы представляют сущность общей теории, на основании которой можно приступить к проектированию машин.

### 1-3. ЗАДАЧИ КОНСТРУКТОРА

Проектирование электрических машин индивидуального и серийного производства требует от конструктора не только знания теории машин и различных вопросов, относящихся к электромагнитным явлениям, нагреву, вентиляции, механическому расчету, но и знания технологии и условий эксплуатации. Таким образом, помимо опыта и знания конструкций, требуется значительная широта кругозора. Высокий уровень конструкторской мысли в нашей стране позволяет поставить перед советским конструктором особую задачу. Эта задача заключается в выработке системы, составляющей советскую конструктивную науку — науку об особых законах проектирования и о законах конструкций. В этой системе должны гармонически сочетаться:

1. Законы общей и конкретной экономики, включающие: а) законы развития социалистической промышленности (соответственно плану развития отдельных областей — гидростроительства, паротурбостроения, металлургии и т. д.); б) условия и требования экономики эксплуатации (срок службы, эксплуатационные расходы, надежность, безаварийность, безопасность, простоту обслуживания, соответствие заданным рабочим характеристикам и т. д.); в) экономику технологии (новые материалы, удешевление производства, унификацию деталей и т. д.); г) законы экономического проектирования электрических машин (экономику проектирования в смысле решения задач экономической геометрии).

2. Требования и тенденции развития электрического привода и передачи энергии. В качестве примера таких требований можно указать:

для электропривода: а) минимум маховых моментов в реверсивных двигателях, б) повышение пределов и плавности регулирования скорости двигателей, в) пусковые характеристики, перегружаемость и пр.;

для передачи энергии: а) динамическая перегружаемость синхронных генераторов, б) асинхронные характеристики, в) моменты при коротких замыканиях, г) инерционные постоянные и т. д.

3. Методы и направления развития теории и расчета электрических машин, т. е. электрического, вентиляционного, теплового и механического расчетов. Конструктор должен не только использовать существующие научные данные, но и создавать определенную методологию проектирования. Так, например, нельзя считать, что установившиеся конструктивные формы электрических машин не подлежат изменению и что методы расчетов всех машин являются вполне удовлетворительными. Требуются дальнейшее развитие и обобщение этих методов.

При современном масштабе производства каждое усовершенствование машин является весьма значительным и в ряде случаев при-

водит к крупным преобразованиям. Так, введение некоторых новых сортов изоляции (например слюдинита) является на первый взгляд мелким усовершенствованием, но если принять во внимание, что стоимость слюдяной изоляции высоковольтной машины намного превосходит стоимость ее активных материалов, то станет очевидным, что удешевление стоимости изоляции приводит к резкому удешевлению стоимости машины; использование водорода для охлаждения машин способствует возрастанию мощности данной машины на 25% при тех же потерях; использование холоднокатаной стали понижает потери почти вдвое и т. д. В настоящее время особенно эффективным путем усовершенствования машин является тщательная конструктивно-технологическая разработка при проектировании. Разработка должна быть основана на современных достижениях в материаловедении (применение новых сплавов, новых изоляционных материалов), в теории прочности, в технологии (новые методы сварки и термообработки, точное литье, холодная штамповка и прокатка) и пр. Хороший конструктор должен быть и хорошим технологом.

Необходимо отметить, что разделение на инженеров-конструкторов и инженеров-расчетчиков означает простое разделение труда в промышленности, и в этом смысле оно весьма полезно. Но, по существу, расчет и конструирование являются органически связанными процессами и поэтому, например, невнимание расчетчика к проблемам конструирования является весьма вредным. Хороший конструктор должен быть также и хорошим расчетчиком.

### 1-4. МОЩНОСТЬ МАШИНЫ И ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ

Как известно из курса электрических машин, мощность, скорость вращения и основные размеры любой электрической машины связаны весьма важной формулой, вывод которой приведен ниже. Если обозначить поток на один полюс через $\Phi$, а число полюсов через $2p$, то $\Phi_п = 2p\Phi$ можно назвать **полным магнитным потоком машины**. Если ввести линейную нагрузку якоря

$$A = \frac{I_{пр}N}{\pi D} = \frac{\text{число всех амперпроводов}}{\text{длина окружности якоря}} = \frac{2m\,Iw}{\pi D}, \qquad (1)$$

где $N$ — число проводников;
$I_{пр}$ — ток в одном проводнике;
$I$ — фазный ток;
$m$ — число фаз;
$w$ — число витков в фазе,

то получим полный ток машины, равный

$$I_п = I_{пр}\ N = \pi DA. \qquad (2)$$

**Полная внутренняя или расчетная мощность**

$$P_i \approx P = mEI.$$



Для машин переменного тока э. д. с. фазы

$$E = \pi\sqrt{2}\,fk_w w\Phi\ в, \qquad (3)$$

где частота $f = pn$.

Тогда

$$\boxed{P = \frac{\pi\sqrt{2}}{4}\,k_w\,(2p\Phi)\,(\pi DA)\,n\ вт,}$$

т. е. полная мощность практически равна произведению полного тока на полный поток и на скорость вращения $\left(\frac{\pi\sqrt{2}}{4}\,k_w \approx 1\right)$.

Для машин постоянного тока

$$E = \frac{N}{a}\,p\Phi n,$$

$$I = 2aI_{пр},$$

где $a$ — число пар параллельных ветвей;
$n$ — число оборотов в секунду.

Так как $I_{пр}\,N = \pi DA$, то

$$\boxed{P = (2p\Phi)\,(\pi DA)\,n\ вт.} \qquad (4)$$

Для трансформаторов

$$E = \pi\sqrt{2}\,fw\Phi,$$

а полная мощность при числе фаз (стержней) $m$

$$\boxed{P = mEI = m\pi\sqrt{2}\,\Phi\,(Iw)\,f.} \qquad (5)$$

Как видно, во всех электрических машинах мощность [*вт*] равна произведению полного тока [*а*], полного потока [*вб*] и скорости вращения [об/сек]. (В трансформаторах скорости вращения соответствует величина $\pi\sqrt{2}f$). Как будет показано ниже, искусство конструктора состоит в правильном выборе этих трех величин: увеличение полного потока требует увеличения размеров магнитной цепи и веса машины, увеличение полного тока (м. д. с.) требует увеличения сечения и веса меди, увеличение скорости вращения или частоты связано с механическими напряжениями и потерями. Экономические обоснования выбора размеров машин изложены ниже.

**Связь основных размеров и мощности машин и трансформаторов** получим, подставляя в уравнения полной мощности значение потока

$$\Phi = B_{\delta\,ср}\,\tau l_i = B_{\delta\,ср}\,\frac{\pi D}{2p}\,l_i, \qquad (6)$$

где $B_{\delta\,ср}$ — средняя индукция в воздушном зазоре;
$\tau = \frac{\pi D}{2p}$ — полюсное деление;
$l_i$ — расчетная активная длина машины.

Для машин переменного тока

$$P = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} k_w (2p\,\Phi)(\pi DA)\,n = \frac{1}{4}\pi^3\sqrt{2}\,k_w D^2 l_i n A B_{\delta\,ср}, \qquad (7)$$

где

$$B_{\delta\,ср} = \alpha_i B_\delta;$$

$B_\delta$ — максимальное значение индукции в зазоре;
$\alpha_i$ — отношение средней индукции к максимальной.

При синусоидальной форме кривой поля

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \qquad (8)$$

и

$$\boxed{P = \frac{\pi^3 k_w}{\sqrt{2}} D^2 l_i A B_\delta n \ \ вт.} \qquad (9)$$

Для машин постоянного тока

$$P = (2p\Phi)(\pi DA)\,n = \pi^2 D^2 l_i A B_{\delta\,ср} n \ \ вт. \qquad (10)$$

Здесь кривая поля значительно отклоняется от синусоиды и $\alpha_i$ лежит в пределах 0,65—0,75; при этом

$$\boxed{P = \pi^2 \alpha_i D^2 l_i A B_\delta n.} \qquad (11)$$

Для трансформаторов

$$\Phi = B\,\frac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe}, \qquad (12)$$

где $B$ — индукция в сердечнике;
$D$ — эквивалентный диаметр сердечника;
$\frac{\pi}{4} D^2$ — площадь сечения сердечника;
$\varphi_{Fe}$ — коэффициент заполнения сечения круга, в среднем равный 0,75—0,8.

Линейная нагрузка в трансформаторе

$$A = \frac{I_1 w_1}{l_{si}} = \frac{F_1}{l_{si}}, \qquad (13)$$

где $F_1 = I_1 w_1$ — м. д. с. первичной обмотки ($F_1 = F_2 = I_2 w_2$);
$l_{si}$ — высота обмотки, равная расчетной высоте стержня.

Из формулы (5) получаем

$$\boxed{P = m\pi\sqrt{2}\,fF_1\Phi = m\pi\sqrt{2}\,fS_{Cu}S_{Fe}sB,} \qquad (14)$$

где $S_{Fe}$ и $S_{Cu}$ — сечение железа сердечника и общее сечение меди катушки;
$s$ — плотность тока,

или

$$\boxed{P = \frac{1}{4} m\pi^2\sqrt{2}\,\varphi_{Fe} D^2 l_{si} A B f.} \qquad (15)$$



Как видно из формулы (9) и (11), величина $D^2 l_i$, пропорциональная объему материалов, во всех машинах равна

$$D^2 l_i = \frac{P}{nAB_\delta \alpha_i \pi^2} \qquad (16)$$

(если принять для машин переменного тока $\frac{k_w}{\sqrt{2}} \approx \alpha_i$).

В трансформаторах объем всех $m$ сердечников

$$mD^2 l_{si} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2 \varphi_{Fe}} \cdot \frac{P}{fAB}, \qquad (17)$$

т. е. объем обратно пропорционален частоте и удельным нагрузкам $A$ и $B$.

Таким образом:

а) если мощность и скорость вращения или частота заданы, то объем и вес активных материалов, затрачиваемых на машину, зависят от величины удельных нагрузок;

б) если задана мощность машины, а скорость вращения или частота подлежат выбору, то при заданных удельных нагрузках объем и вес активных материалов будут уменьшаться при повышении частоты или скорости вращения; при этом, однако, необходимо иметь в виду, что с повышением частоты или скорости возрастают потери машины и удельные нагрузки должны быть понижены. Поэтому существуют оптимальные значения частот и скоростей, рассматриваемые ниже.

Естественно, что конструктор всегда стремится к меньшей затрате материалов на единицу мощности и, следовательно, вопрос о выборе удельных нагрузок является наиболее существенным. Рассмотрим вопрос о выборе $A$ и $B_\delta$ для наиболее часто встречающихся в практике условий: заданных значений мощности, частоты и скорости вращения.

## 1-5. УДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Индукция. Стремление повысить индукции в машинах или трансформаторах с целью уменьшения затрат активных материалов приводит:

а) к возрастанию потерь в листовой стали на гистерезис и вихревые токи, пропорциональных квадрату индукции и частоте в степени около 1,3 *;

б) к возрастанию насыщения, а следовательно, величины намагничивающего тока, увеличение которого приводит к уменьшению коэффициента мощности (cos φ) в машинах переменного тока и к повышению потерь в меди обмоток возбуждения во всех машинах;

в) к изменению электрических свойств машины, связанных с насыщением, например, к изменению параметров, условий коммутации и т. д.

---

* Имеется в виду сталь толщиной 0,5 *мм* и сравнительно узкий диапазон частот 0—200 *гц*.

Таким образом, величина выбираемой индукции должна находиться в определенных пределах, выбор которых зависит от типа машины, мощности и ряда других условий. На рис. 170, 207, 265 приведены кривые $B_\delta = f(P)$, из которых видно, что по мере роста мощности индукция в воздушном зазоре машин возрастает до величины 0,9—1 *вб/м²* (9000—10 000 *гс*).

Линейная нагрузка. Стремление повысить линейную нагрузку с целью уменьшения затраты материала приводит:

а) к возрастанию потерь, снимаемых с единицы поверхности обмоток, а следовательно, и к увеличению их нагрева;

б) к изменению электрических параметров обмотки; при прочих равных условиях относительная реактивность обмоток возрастает пропорционально отношению $\frac{A}{B_\delta}$;

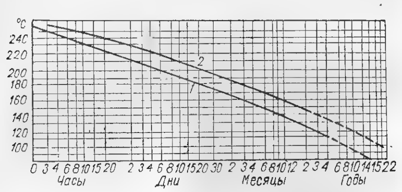



Рис. 1. Кривые срока службы изоляции класса А:
*1* — нижний предел; *2* — верхний предел.

в) к нарушению экономического соотношения между потерями в меди и в железе.

Таким образом, величина выбираемой нагрузки также должна находиться в определенных пределах, выбор которых зависит от типа машины, мощности, напряжения и ряда других условий. На рис. 170, 207, 264 приведены кривые применяемых на практике линейных нагрузок машин в функции мощности, которые показывают, что $A$ достигает предела 600 ÷ 700 *а/см* для крупных машин, а в сверхмощных машинах при форсированных системах охлаждения до 1200 *а/см* и выше.

Плотность тока. Плотность тока наряду с линейной нагрузкой характеризует использование активных материалов машины, удельные потери в меди и экономическое отношение между потерями в меди и в железе*. Существуют величины плотности тока, линейной нагрузки и индукции, которые могут быть названы экономическими.

Обычно в практике удельные нагрузки выбираются из условий предельно допустимого нагрева. Однако значения по предельному нагреву, вообще говоря, не совпадают с экономическими.

Значения удельных нагрузок не должны превышать своих пределов по нагреву, так как машина не должна иметь температуру выше допускаемой по нормам, определяемой в свою очередь экономическим «сроком жизни» изоляции.

На рис. 1 представлены «кривые жизни» изоляции в зависимости от ее температуры [60]. Эти кривые, полученные опытным путем, показывают, что если температура обмотки непрерывно поддерживается на 8—10° С выше, чем допустимая по нормам, то срок жизни изоляции в среднем сократится вдвое.

Плотности тока, следовательно, также имеют некоторые предельные значения (гл. 9—12).

* Хотя «железо» машины представляет в большинстве случаев электротехническую сталь, однако мы считаем целесообразным сохранение в ряде случаев термина «железо», понимая его в смысле магнитопровода. Термин «сталь» вводится в тех случаях, когда речь идет о марке стали и т. п.

## 1-6. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ И РАЗМЕРЫ

Для трансформаторов полный ток (ампер-витки) одной обмотки с одной стороны равен произведению плотности тока на чистое сечение меди

$$sq_{\mathrm{Cu}\,1} = sb_{\mathrm{Cu}\,1}H_{\mathrm{Cu}},$$

а с другой стороны — произведению линейной нагрузки на длину сердечника, т. е.

$$sb_{\mathrm{Cu}\,1}H_{\mathrm{Cu}} = Al_{si}.$$

Отсюда получаем

$$s = \frac{Al_{si}}{b_{\mathrm{Cu}\,1}H_{\mathrm{Cu}}} = \frac{A}{b_1}\cdot\frac{b_1}{b_{\mathrm{Cu}\,1}}\cdot\frac{l_{si}}{H_{\mathrm{Cu}}} = \frac{A}{b_1\varphi'_{\mathrm{Cu}}}, \tag{18}$$

где $b_{\mathrm{Cu}\,1}$ — ширина чистой меди одной обмотки;

$b_1$ — ширина катушки (см. рис. 140);

$\varphi'_{\mathrm{Cu}}$ — коэффициент заполнения катушки медью, причем

$$\varphi'_{\mathrm{Cu}} = \varphi_H\varphi_b,$$

где $\varphi_H = \frac{H_{\mathrm{Cu}}}{l_{si}}$ — коэффициент заполнения сечения катушки по высоте;

$\varphi_b = \frac{b_{\mathrm{Cu}\,1}}{b_1}$ — коэффициент заполнения сечения катушки по ширине.

Мощность трансформатора по формуле (15) будет равна

$$P = \frac{m}{4}\pi^2\sqrt{2}\,\varphi_{\mathrm{Fe}}fD^2l_{si}A\ B = \frac{m}{4}\pi^2\sqrt{2}\,\varphi_{\mathrm{Fe}}\varphi'_{\mathrm{Cu}}fD^2l_{si}b_1\cdot sB. \tag{19}$$

Если ввести полный коэффициент заполнения окна

$$\varphi_{\mathrm{Cu}} = \frac{b_{\mathrm{Cu}\,1}H_{\mathrm{Cu}}}{0{,}5l_0l_s}, \tag{19а}$$

то из формулы (19) получим

$$P = \frac{m\pi^2}{8} \sqrt{2}\, f \varphi_{Fe} \varphi_{Cu} \alpha \lambda s B D^4 \ вт, \quad (19б)$$

где $\alpha = \frac{l_s}{D}$; $\lambda = \frac{l_0}{2D}$;

$l_s$ — высота стержня;
$l_0$ — ширина окна.

Диаметр сердечника по (19б)

$$D = \sqrt[4]{\frac{8P}{m\pi^2 \sqrt{2} f \varphi_{Fe} \varphi_{Cu} \alpha \lambda s B}} \ см. \quad (20)$$

Из формулы (20) видно, что диаметр, а следовательно, и все другие размеры трансформатора заданной мощности и частоты зависят: а) от удельных нагрузок s и $B$ (чем выше нагрузки, тем меньше размеры); б) от коэффициентов заполнения $\varphi_{Fe}$ и $\varphi_{Cu}$; первый изменяется мало, а второй зависит от мощности и напряжения (чем выше напряжение, тем $\varphi_{Cu}$ меньше (рис. 151); в) от геометрических соотношений $\alpha$ и $\lambda$. В параграфе 9-2 показано, что произведение $\alpha\lambda\varphi_{Cu} s B \varphi_{Fe}$ имеет оптимальное значение, почти постоянное для широкого диапазона мощностей и напряжений трансформаторов. Для $\alpha$ и $\lambda$ существуют оптимальные пределы ($1{,}5 < \alpha < 4$; $0{,}35 < \lambda < 0{,}8$); при этом бо́льшим значениям $\alpha$ соответствуют бо́льшие значения $\lambda$ и меньшие значения $\varphi_{Cu}$ $\varphi_{Fe}$. При экономических плотностях тока s, индукциях $B$ и средних коэффициентах заполнения $\varphi_{Cu} = 0{,}25$, $\varphi_{Fe} = 0{,}75$ диаметр сердечника получается равным

$$D = C_т \cdot \sqrt[4]{P\left(\frac{50}{f}\right)} \ см, \quad (20а)$$

где $P$ — в *вт*;
$C_т = \text{const} = 0{,}85 - 0{,}9$.

Формула (20а) может служить для ориентировочной оценки величины $D$.

В электрических машинах зубцовое деление, или шаг паза якоря, $t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}$ может подразделяться на паз и зубец по-разному. Можно сделать пазы широкие и мелкие или узкие и глубокие. Рабочие свойства машины и ее экономичность в определенной мере зависят от «геометрии зубцовой зоны», т. е. от того, насколько правильно выбраны размеры зубцов и пазов.

Отношение сечения чистой меди паза к полному сечению паза называется коэффициентом заполнения паза

$$\frac{q_{Cu}}{q_п} = \varphi_{Cu}. \quad (21)$$

Величина его зависит от напряжения машины (толщины изоляции), а также от типа обмотки и числа пазов. Обычно для низковольтных машин $\varphi_{Cu} = 0{,}5 - 0{,}6$, для высоковольтных — $0{,}35 - 0{,}4$, для мелких машин с многовитковыми секциями — $0{,}25 - 0{,}3$.



Отношение ширины паза $b'_п$ к шагу паза $t_1$ называют коэффициентом ширины паза

$$\lambda = \frac{b'_п}{t_1}. \quad (22)$$

При этом под шириной паза любой формы $b'_п$ следует понимать эквивалентную ширину

$$b'_п = \frac{q_п}{h_п}. \quad (23)$$

Полный ток паза, с одной стороны, равен произведению плотности тока на общее сечение меди, с другой — произведению линейной нагрузки на шаг паза

$$s q_{Cu} = s \varphi_{Cu} q_п = A t_1, \quad (24)$$

или

$$s h_{Cu} b_{Cu} = s \varphi_{Cu} h_п b'_п = A t_1. \quad (25)$$

Из формулы (25) получим связь между плотностью тока и линейной нагрузкой

$$s = \frac{A}{h_п \lambda \varphi_{Cu}}. \quad (26)$$

Амплитуда основной гармоники индукции в зазоре $B_{\delta 1}$ может быть выражена через среднеквадратичную индукцию в зубцах $B$, которая в большинстве случаев близка к средней индукции в зубцах. Индукция $B$ определится тем, что произведение ее квадрата на вес зубцов $G_z$ и коэффициент удельных потерь для данного сорта стали $k_z$ даст потери в зубцах

$$p_z = k_z B^2 G_z.$$

Откуда

$$B = \sqrt{\frac{p_z}{k_z G_z}}. \quad (27)$$

Поток на одном зубцовом делении равен

$$B_{\delta 1} t_1 l_i,$$

где $l_i$ — расчетная длина железа якоря; с другой стороны, этот же поток равен

$$B b_z l_{Fe},$$

где $b_z$ — ширина зубца, близкая к средней ширине зубца;
$l_{Fe}$ — длина чистого железа без вентиляционных каналов и лакировки.

Тогда

$$B b_z l_{Fe} = B_{\delta 1} t_1 l_i, \quad (28)$$

откуда

$$B_{\delta 1} = B \frac{b_z}{t_1} \cdot \frac{l_i}{l_{Fe}}. \quad (29)$$

Введем отношения

$$\zeta = \frac{b_z}{t_1} \ и \ \varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i}. \quad (30)$$

Окончательно получаем

$$B_{\delta 1} = B \zeta \varphi_{Fe}. \quad (31)$$

Введя теперь значения $A$ и $B_{\delta 1}$ в формулу (9), получим

$$P = \frac{\pi^2 k_w}{\sqrt{2}} \lambda \varphi_{Cu} \zeta \varphi_{Fe} D^2 l_i n h_п s B. \tag{32}$$

Выразим мощность через полюсное деление, равное

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \tag{33}$$

Одновременно введем в выражение для мощности коэффициенты

$$\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}, \tag{34}$$

который можно назвать коэффициентом глубины паза, и

$$\beta = \frac{\tau}{l_i} \text{ или } \alpha_1 = \frac{1}{\beta}, \tag{35}$$

который можно назвать коэффициентом геометрии полюса, или длины машины, тогда

$$P = 2pf\sqrt{2} k_w \frac{\tau^4}{\beta} k_\varphi \lambda_1 s B. \tag{36}$$

Здесь

$$k_\varphi = \lambda \varphi_{Cu} \zeta \varphi_{Fe} \tag{37}$$

представляет как бы «полный коэффициент заполнения зубцовой зоны», так как он характеризует одновременно коэффициенты заполнения паза и длины железа, а также коэффициенты подразделения ширины паза и ширины зубца.

Таким образом получаем четыре основных конструктивных коэффициента:

1) коэффициент обмотки $k_w$;
2) коэффициент геометрии полюса, или длины машины $\beta$;
3) коэффициент глубины паза $\lambda_1$;
4) полный коэффициент заполнения $k_\varphi$.

Полюсное деление $\tau$, диаметр $D = \frac{2p\tau}{\pi}$ и длина $l_i = \frac{\tau}{\beta}$ получаются из уравнения (36)

$$\tau = \sqrt[4]{\frac{P\beta}{2pf\sqrt{2} k_w k_\varphi \lambda_1 s B}}. \tag{38}$$

От правильного выбора коэффициентов, а также удельных нагрузок зависят не только размеры, но, как будет показано ниже, свойства проектируемой машины и ее экономичность

Оптимальные значения коэффициентов $\lambda$ и $\zeta$, как легко убедиться, находятся в пределах $\lambda = 0,5 - 0,4$; $\zeta = 0,5 - 0,6$, так как при этом получается максимум произведения $\lambda\zeta \approx 0,25$, а следовательно, минимум веса при прочих равных условиях.

Оптимальные значения $\lambda_1$ и $\beta$ исследованы в § 2-8. Исследования показывают, что некоторое отступление от оптимальных величин коэффициентов не приводит к резкому ухудшению свойств машины. Это дает конструктору известную свободу и возможность



удовлетворить как ряду особых требований к машине, так и условиям производства (использование готовых штампов, нормализация, экономичность серии машин и пр.). При проектировании машин всякие наперед заданные «оптимальные соотношения» имеют весьма условный смысл, и действительным критерием правильности выбранных соотношений является оценка машины в эксплуатации.

Оптимальные значения коэффициентов заполнения зависят от правильного выбора напряжения, рода изоляции, типа обмотки и пр. Согласно формуле (38) полюсное деление, а значит габариты и вес машины заданной мощности, скорости вращения и частоты зависят от: а) удельных нагрузок s, $B$ (чем выше нагрузки, тем меньше вес машины); б) коэффициента заполнения $k_\varphi$, который зависит главным образом от напряжения (чем выше напряжение, тем меньше $k_\varphi$); в) относительной глубины паза $\lambda_1$. При предварительном выборе $\tau$ по формуле (38) на основании исследований § 2-8 можно положить $\frac{\beta}{\lambda_1} = k \approx \text{const}$ ($k \approx 2,8 - 3,5$).

При средних значениях коэффициентов: $k_w \approx 0,95$, $\lambda = 0,4$, $\zeta = 0,6$, $\varphi_{Cu} \approx 0,35$, $\varphi_{Fe} \approx 0,85$, экономических удельных нагрузках и $k \approx 3$ полюсное деление машины выразится формулой

$$\tau = C_s' \sqrt[4]{\frac{P}{2p}\left(\frac{50}{f}\right)} \, см, \tag{39}$$

где $C_s' = 1,75 - 2,2$; при этом меньшие значения относятся к многополюсным машинам.

## 1-7. МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ

Машинная постоянная Арнольда может быть получена из уравнения (9)

$$C_A = \frac{D^2 l_i n}{P} = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_w B_\delta A}. \tag{40}$$

Как видно, она пропорциональна объему якоря ($D^2 l$) на единицу мощности, отнесенной к скорости вращения. Так как мощность, отнесенная к скорости вращения, пропорциональна моменту вращения

$$\frac{P}{n} = 2\pi M,$$

то машинная постоянная характеризует, следовательно, расход материалов якоря на единицу вращающего момента и обратно пропорциональна произведению удельных нагрузок $B_\delta A$.

Обратная величина

$$K_A = \frac{1}{C_A} = \frac{\pi^2 k_w B_\delta A}{\sqrt{2}} \tag{41}$$

называется *коэффициентом использования*, так как характеризует мощность на единицу скорости, получаемую с единицы объема якоря.

Для трансформаторов также может быть введена постоянная из формулы (19)

$$C'_T = \frac{mD^2 l_{si} j}{P} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2 \varphi_{Fe} BA}. \tag{42}$$

Так как удельные нагрузки $B$ и $A$ с увеличением мощности возрастают, стремясь к определенному пределу, то коэффициент использования возрастает, а машинная постоянная, наоборот, падает (рис. 171, 206, 263).

Это обстоятельство является чрезвычайно важным. Оно показывает, что в крупных машинах мощность, получаемая с единицы веса, возрастает, т. е. использование материала намного эффективнее, чем в мелких машинах. Коэффициент полезного действия с возрастанием мощности также увеличивается, так как относительные потери падают. Поэтому экономически весьма выгодным является использование более крупных единиц там, где это оказывается возможным по ряду других условий. Второе важное обстоятельство состоит в том, что затраты материала определяются не мощностью, а моментом вращения машины. Поэтому с точки зрения экономии материала выгодно строить по возможности быстроходные машины. Машинная постоянная Арнольда применяется как при оценке использования машины, так и для определения размеров. Из формулы (40) получаем

$$D^2 l_i = C_A \frac{P}{n}.$$

Задаваясь отношением $\gamma = \frac{D}{l_i}$, получим

$$D = \sqrt[3]{C_A \frac{P}{n} \gamma}. \tag{40а}$$

Отношение $\gamma$ зависит от числа полюсов. Согласно § 1-6

$$\gamma = \frac{2p}{\pi} \frac{\tau}{l_i} = \frac{2p}{\pi} \beta,$$

откуда

$$D = \sqrt[3]{C_A \frac{P}{n} \cdot \frac{2p}{\pi} \beta}. \tag{40б}$$

Машинная постоянная $C_A$ может быть определена по формуле (40) путем выбора индукции $B_\delta$ и линейной нагрузки $A$ на основе опыта построенных машин (рис. 170, 207, 264, 265) или выбрана непосредственно по кривым (рис. 171, 206, 263).

Машинная постоянная характеризует, главным образом, в е с  а к т и в н ы х  м а т е р и а л о в, отнесенный к моменту вращения. Наряду с активными материалами существуют конструктивные (корпус статора, щиты, подшипники, вал, полюсное колесо и т. д.). В е с  к о н с т р у к т и в н ы х  м а т е р и а л о в приблизительно пропорционален весу активных, но коэффициент пропорциональности зависит от целого ряда факторов, как например, типа машины числа плюсов, характера конструкции (сварная, литая), рода материалов (чугун, сталь, алюминий и т. д.), системы вентиляции и, наконец, степени конструктивной проработки, т. е. правильного выбора загрузок материалов и их конструктивных форм. Правильный выбор предполагает минимум затрат и удовлетворение условиям надежности конструкции. Особое положение занимает и з о л я ц и я машины, которая может быть отнесена как к конструктивным, так и к активным материалам. В высоковольтных машинах стоимость изоляции иногда превосходит стоимость всех прочих материалов. Поэтому для удешевления машины весьма существенно определение оптимальной величины ее напряжения.



## 1-8. ПОНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МАШИНЫ

Вначале рассмотрим задачу о проектировании одной машины, так как при проектировании серии машин появляется ряд особых требований.

При проектировании машины конструктор не может в равной мере удовлетворить всем требованиям. Принимаются в соображение сначала основные требования, а затем, в известной мере, учитываются и все остальные. В основном машина должна удовлетворять:

1) нормам ГОСТ по нагреву и иметь «тепловой запас» (термическая надежность);

2) нормам ГОСТ по напряжению (электрическая надежность);

3) требованиям в отношении допустимых механических напряжений (механическая надежность);

4) требованиям эксплуатации или нормам ГОСТ в отношении перегрузочной способности по моменту или устойчивости, к. п. д. и его зависимости от нагрузки, $\cos\varphi$, пускового момента (для двигателей), кратностей токов короткого замыкания или пусковых токов;

5) требованиям в отношении минимума габарита и веса, а также минимума стоимости материалов, производства и эксплуатации.

Необходимо заметить, что минимум габарита и веса еще не означает минимума стоимости материалов, так как могут быть употреблены, без особой на то необходимости, материалы повышенной стоимости. Кроме того, в стоимость материалов должна входить и стоимость полуфабрикатов. Так, например, за стоимость меди должна быть взята стоимость обмотки, а не стоимость обмоточного провода. Далее, требование минимума стоимости материалов и минимума стоимости эксплуатации в известном смысле противоречивы: не всегда машина более легкая и более дешевая будет и более экономичной. Надо учитывать ее к. п. д., стоимость потерь и ремонтов за время эксплуатации.

Возникает вопрос, существует ли оптимальный вариант конструкции машины, под которым будем понимать машину, полностью удовлетворяющую техническим и эксплуатационным требованиям и при этом имеющую минимальную стоимость в производстве и эксплуатации? Существуют ли закономерности, позволяющие сразу найти оптимальный вариант? На этот вопрос можно сразу дать ответ. Такой вариант установить невозможно. Однако возможно найти закономерности, которые позволяют определить более или менее узкую область, в которой могут находиться оптимальные варианты, приблизительно одинаково экономичные, но отличающиеся тем, что одни экономические показатели будут более благоприятными у одного варианта, но зато менее благоприятны будут другие показатели, а у другого наоборот. Весомость отдельных показателей является весьма условной, и точная оценка вариантов в этой области невозможна. Например, один вариант по сравнению с другим имеет несколько более высокий к. п. д., но имеет бо́льшую затрату материалов, или один вариант имеет хорошие показатели в отношении к. п. д., но менее удовлетворительные динамические свойства (момент инерции ротора) и т. п.

Значение отдельных показателей зависит от использования машины, а также от общей конъюнктуры и характера развития тех областей техники, для которых выпускаются машины. Например, до последнего времени одним из основных требований в отношении синхронных машин являлась определенная величина отношения короткого замыкания (о. к. з.).

В настоящее время ввиду развития автоматического регулирования и компаундирования это требование в значительной степени утратило свое значение. Внедрение новых теплостойких сортов изоляции, новых сортов электротехнической стали по-новому ставит вопрос о допустимых нагрузках на медь и сталь. Какой же смысл при проектировании имеет установление общих оптимальных размеров машин и их соотношений? Смысл состоит во-первых, в том, чтобы при определенных заданных условиях получить машину с минимумом затрат материалов, а во-вторых, в том, чтобы при необходимости отступления от оптимальных соотношений было возможно оценить стоимость таких отступлений. Вопросу оптимальных размеров электрических машин посвящено большое количество работ отечественных и иностранных ученых и инженеров [20], [121, 129]. Существует известная теория соразмерности, или экономическая геометрия электрических машин, развитая М. Видмаром [20]. Эта теория сохранила определенное значение и в настоящее время. Однако она во многих отношениях является спорной. Кроме того, эта теория развита на базе капиталистической экономики и не может быть применена полностью в условиях социализма. Весьма важные положения по проектированию установлены и в ряде других трудов. К сожалению, многое из опыта заводского проектирования не нашло еще должного освещения в литературе.



## 1-9. О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ, ИЛИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МАШИН

### Закономерности в геометрически подобных* машинах

Из основного уравнения (36) для мощности машины при заданных удельных нагрузках $s$ и $B$ и заданных коэффициентах $k_w$, $\beta$, $\lambda_1$, $k_\varphi$ видно, что мощность пропорциональна четвертой степени линейных размеров. Так как в геометрически подобных машинах число полюсов не изменяется, то в качестве линейного размера может быть взят любой размер $L$ (в частности полюсное деление $\tau$).

В общем случае

$$P/2p = kL^4, \tag{43}$$

где $k$ — коэффициент пропорциональности.

Обратно: линейные размеры геометрически подобного ряда машин пропорциональны корню четвертой степени из мощности

$$L = k_1 (P/2p)^{1/4}. \tag{44}$$

При этих условиях вес машин $G$, стоимость материалов $M_m$ и электромагнитные потери $\Sigma p_э$ пропорциональны объемам, т. е. кубу линейных размеров

$$\left.\begin{aligned} G &= k_2L^3 = k_3 (P/2p)^{3/4}\, 2p \\ M_m &= k_4L^3 = k_5 (P/2p)^{3/4}\, 2p \\ \Sigma p_э &= k_6L^3 = k_7 (P/2p)^{3/4}\, 2p \end{aligned}\right\}. \tag{45}$$

Вес, стоимости и потери на единицу мощности обратно пропорциональны линейным размерам или мощности на полюс в степени $\frac{1}{4}$

$$\frac{G}{P} = \frac{k_3 (2p)^{1/4}}{P^{1/4}};\quad \frac{M_m}{P} = \frac{k_5 (2p)^{1/4}}{P^{1/4}};\quad \frac{\Sigma p_э}{P} = \frac{k_7 (2p)^{1/4}}{P^{1/4}}. \tag{46}$$

К. п. д., равный $1 - \frac{\Sigma p_э}{P^{1/4}}$, при постоянстве удельных нагрузок изменяется по закону

$$\eta = 1 - \frac{k_7 (2p)^{1/4}}{P^{1/4}}. \tag{47}$$

Выражения (45), (47) пригодны для приближенных оценок при сравнивании машин. Для реальных серийных машин относительные потери и стоимости материалов изменяются не точно по уравнениям (46), (47). Это обусловлено следующими причинами:

1) не все размеры машин серии строго пропорциональны;

2) одна из главных составляющих стоимости — стоимость изоляции (в особенности для высоковольтных машин) изменяется не пропорционально кубу линейных размеров;

3) удельные нагрузки не постоянны для всех машин серии, а изменяются в зависимости от мощности и условий отвода тепла.

* Геометрически подобный ряд машин возрастающей мощности можно представить себе как «идеализированную серию» § 2-10.

Относительные потери и стоимости материалов являются важнейшими **экономическими** показателями машины.

Следует заметить, что при оценке конструктивных вариантов машин необходимо сравнивать не только стоимости активных материалов (меди и стали, как часто это делают), но сравнивать их и по стоимости изоляции, в особенности, если варианты выполнены на разные напряжения.

Так как вес, стоимости и потери согласно формуле (45) пропорциональны мощности в степени $\frac{3}{4}$, то их отношения к мощности в степени $\frac{3}{4}$ представляют некоторые постоянные величины, независимые от мощности (если удельные нагрузки постоянны и машины геометрически подобны). Эти постоянные называются **производным весом, производной стоимостью и производными потерями**

$$G_{\text{пр}} = \frac{G}{P^{3/4}}; \quad M_{m\text{пр}} = \frac{M_m}{P^{3/4}}; \; \Sigma p_{\text{э. пр}} = \frac{\Sigma p_{\text{э}}}{P^{3/4}}. \tag{48}$$

Производные величины позволяют произвести сравнение экономичности или соразмерности проектных вариантов.

Наиболее соразмерной будет машина, у которой эти величины будут минимальными.

Если скорости вращения сравниваемых машин не равны, то вместо $P$ необходимо подставить момент вращения, пропорциональный $\frac{P}{n}$,

$$G'_{\text{пр}} = \frac{G}{\left(\frac{P}{n}\right)^{3/4}}; \; M'_{m\text{пр}} = \frac{M_m}{\left(\frac{P}{n}\right)^{3/4}}; \; \Sigma p'_{\text{э. пр}} = \frac{\Sigma p_{\text{э}}}{\left(\frac{P}{n}\right)^{3/4}}. \tag{49}$$

Производные веса, стоимости и потери являются весьма приближенной характеристикой экономичности по тем же причинам, что и рассмотренные выше относительные значения.

## Принципы соразмерности

Пусть перед конструктором поставлена задача проектирования машины заданной мощности и скорости вращения. Легко видеть, что даже при выбранных значениях удельных нагрузок (индукции и плотности тока) существует бесчисленное множество решений. Прежде всего возникают вопросы о соотношении диаметра и длины машины, о соотношении весов меди и стали машины и о соотношении потерь. Из уравнения (40) при выбранных значениях $B_\delta$ и $A$ получается произведение

$$D^2 l = C_{\text{A}} \frac{P}{n},$$

пропорциональное объему якоря. Но одному и тому же объему можно придать разные формы. Машина может быть вытянутой в длину или, наоборот, увеличенной в диаметре (рис. 2). В дальнейшем возникают вопросы о соотношении весов и цен меди и железа машины, о соотношении потерь в меди и потерь в железе, о подразделении шага зубца на ширину паза и ширину зубца, о соотношении стоимостей ярма и зубцов и т. д. В первые годы развития электромашиностроения конструктор действовал по принципу, сформулированному проф. А. Е. Алексеевым в трех словах: «задавайся», «проверяй», «исправляй». Здесь основное значение имел «глазомер», опыт и искусство конструктора. После первой мировой войны М. Видмаром были сформулированы законы «экономической геометрии» и принципы соразмерности [20]. Как показано ниже, эти «законы» во многих случаях далеки от действительности и не могут быть положены в основу выбора размеров

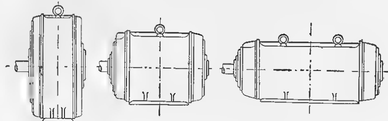


Рис. 2. Машины с различным отношением длины и диаметра.

Их можно сформулировать применительно к трансформатору следующим образом:

1. При заданной сумме потерь и заданной мощности трансформатор будет наиболее дешевым при равномерном распределении потерь между медью и сталью.
2. При заданной сумме потерь и заданной мощности трансформатор будет наиболее дешевым при равномерном распределении стоимостей между медью и сталью.
3. Стоимость ярем должна быть равна стоимости сердечников.
4. Потери в ярмах должны быть равны потерям в сердечниках.

Для машин закон распределения потерь требует, чтобы:

1. Потери в якоре были распределены на четыре равных части:
   а) потери в активной меди;
   б) потери меди в лобовой части;
   в) потери в зубцах;
   г) потери в ярме.
2. Стоимости этих четырех частей были одинаковы и составляли по $\frac{1}{4}$ стоимости всех активных материалов.

Обоснование этих законов не является строгим. Так, например, первый закон — закон распределения потерь между сталью и медью — основан на том, что максимум мощности заданной модели по (37) получится при максимуме произведения $sB$. Но максимум $sB$ при заданной сумме потерь в меди и в стали

$$\Sigma p_{\text{э}} = s^2 k_{\text{Cu}} G_{\text{Cu}} + B^2 k_{\text{Fe}} G_{\text{Fe}} \tag{50}$$

будет, очевидно, при равенстве

$$s^2 k_{Cu} G_{Cu} = B^2 k_{Fe} G_{Fe}. \qquad (51)$$

Постоянные $k_{Cu}$ и $k_{Fe}$ равны потерям в меди и в стали на 1 *кг* веса при единице плотности тока и единице индукции; если плотность тока выражена в *а/см²*, а индукция в *вб/см²*, то

$$k_{Cu} = \frac{\rho}{\gamma_{Cu}} \text{ и } k_{Fe} = p'_{10} \cdot 10^8,$$

где

$\rho$ — удельное сопротивление меди, *ом · см*;

$\gamma_{Cu}$ — удельный вес меди, *кг/см³*;

$p'_{10}$ — удельные потери в *вт/кг* при индукции $10^{-4}$ *вб/см²* (10 000 *гс*).

Доказательство второго закона — закона равномерного распределения стоимостей — еще менее строго. Сначала доказывается, что при заданных электромагнитных потерях $\Sigma p_э$ и заданном отношении потерь

$$\xi = \frac{p_{Cu}}{p_{Fe}} \qquad (52)$$

произведение весов меди и стали равно постоянной величине

$$G_{Fe} G_{Cu} = \text{const}.$$

Затем, так как общая стоимость

$$M_m = m_{Fe} G_{Fe} + m_{Cu} G_{Cu},$$

где $m_{Fe}$ и $m_{Cu}$ — стоимости единицы веса стали и меди, то минимум стоимости получится при равенстве

$$m_{Fe} G_{Fe} = m_{Cu} G_{Cu}. \qquad (53)$$

Распределение потерь и стоимостей на четыре равные части доказывается из условия минимума производного веса или производной стоимости. Представим себе какую-либо модель машины. Оставим в ней все размеры постоянными и будем увеличивать только длину. При этом мощность будет возрастать пропорционально длине $x$, а общая стоимость будет изменяться по закону

$$M_m = M_л + M'_a x,$$

где

$M_л$ — стоимость лобовой части, остающаяся неизменной;

$M'_a$ — стоимость всей активной части на единицу длины.

Производная стоимость

$$M_{mпр} = \frac{M_m}{P^{3/4}} = k\frac{M_л + M'_a x}{x^{3/4}}$$

будет иметь минимум при

$$M_л = \frac{1}{3} x M'_a = \frac{1}{4}(x M'_a + M_л) = \frac{1}{4} M_m, \qquad (54)$$

что можно получить из уравнения

$$\frac{\partial M_{mпр}}{\partial x} = 0.$$



Таким образом, стоимость лобовой части составляет $\frac{1}{2}$ от стоимости меди обмотки, $\frac{1}{3}$ от стоимости всей активной части (стали и меди) или $\frac{1}{4}$ от стоимости всех активных материалов.

Аналогичным образом, т. е. изменяя глубину паза и оставляя ярмо неизменным, можно доказать, что стоимость ярма $M_j$ равна $\frac{1}{4}$ от полной стоимости машины

$$M_j = \frac{1}{4} M_m. \qquad (55)$$

Так как из (53) стоимости стали и меди должны быть равны, то отсюда непосредственно следует закон равных стоимостей четырех частей машины.

Совершенно так же, исходя из минимума производных потерь, можно показать, что и потери в этих частях должны быть распределены равномерно.

### Отклонения от «идеальных» принципов соразмерности в практике

Рассматривая различные конструкции машин и трансформаторов, мы видим в отдельных случаях достаточно «соразмерные» машины, в других случаях машины отступающие (иногда значительно) от принципов соразмерности.

Основные причины этого заключаются в следующем:

1. Машина должна быть экономичной не только в смысле минимума стоимости материалов, но главным образом в смысле ее наилучших рабочих свойств. Для получения заданных рабочих свойств машины (электрические характеристики, параметры, ток короткого замыкания, падение напряжения, $\cos\varphi$ и т. д.) предъявляются определенные требования, часто вступающие в противоречие с требованиями соразмерности. Все эти требования можно назвать эксплуатационно-техническими. Они, разумеется, должны быть выполнены в первую очередь.

Приведем один пример. В быстроходных турбогенераторах потери и стоимость ярма превосходят потери и стоимость зубцов в 3—4 раза, а иногда и больше, в то время как идеальная соразмерность требует их равенства. Если бы мы сделали эти потери и стоимости равными, то пришлось бы высоту зубцов сделать недопустимо большой и это привело бы к совершенно неудовлетворительным рабочим характеристикам турбогенератора.

2. Вторая причина заключается в противоречиях самих идеальных законов соразмерности при их выполнении в реальной машине.

Практически невозможно и нецелесообразно удовлетворить одновременно требованиям равенства стоимости и равенства потерь в рассматриваемых четырех частях машины. При условии равенства потерь в меди и стали трансформатора в отдельных случаях по-

лучаются недопустимо малые нагрузки на медь. Из уравнения (50) следует

$$s = B\sqrt{\xi\frac{k_{Fe}G_{Fe}}{k_{Cu}G_{Cu}}}, \tag{56}$$

где

$$\xi = \frac{p_{Cu}}{p_{Fe}} = \frac{\text{потери в меди}}{\text{потери в стали}}.$$

Подставляя соотношение стоимости стали и меди

$$\psi = \frac{M_{Fe}}{M_{Cu}} = \frac{G_{Fe}m_{Fe}}{G_{Cu}m_{Cu}}, \tag{57}$$

получим

$$s = B\sqrt{\xi\psi\frac{k_{Fe}m_{Cu}}{k_{Cu}m_{Fe}}}. \tag{58}$$

При «идеальной» соразмерности $\xi = 1$, $\psi = 1$.

Для электрических машин, обозначая

$$\xi = \frac{p_{Cu\,п}}{p_{Fe\,z}} = \frac{\text{потери в меди паза}}{\text{потери в зубцах}},$$

получим

$$s = B\sqrt{\xi\frac{k_{Fe}}{k_{Cu}}\cdot\frac{G_{Fez}}{G_{Cu\,п}}} = B\sqrt{\xi\frac{c_{Fe}}{\rho}\cdot\frac{\zeta\varphi_{Fe}}{\lambda\varphi_{Cu}}}, \tag{59}$$

где

$$c_{Fe} = k_{Fe}\gamma_{Fe}.$$

Если взять отношение цен $\frac{m_{Cu}}{m_{Fe}} = 4$, а коэффициенты потерь равными $k_{Fe} = 1{,}6 \cdot 10^8$, $k_{Cu} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-6}}{8{,}9}1000 = 3{,}14 \cdot 10^{-4}$, то получим

$$s = 1{,}43 \cdot 10^6 B$$

при $p'_{10} = 1{,}6$ *вт/кг* и $\rho = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ *омсм* (при $\theta = 100°$ С и с учетом добавочных потерь).

Для трансформаторов, например, из условий допустимых потерь и нагрева индукция $B$ редко берется выше $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*. При том, согласно (58) плотность тока будет равна 215 *а/см²*, или 2,15 *а/мм²*. Часто такая плотность тока (при интенсивной системе охлаждения) оказывается чрезмерно низкой, и конструктор вынужден нарушать закон потерь и закон стоимости. При этом оказывается целесообразным нарушать равномерно оба закона (согласно формулировке М. Видмара: «Тяжесть отступления должна быть равномерно распределена на все законы»). Конструктор, желая повысить плотность тока, согласно уравнению (58) принимает $\xi > 1$ и одновременно $\psi > 1$. При этом наименьшие последствия отклонений в смысле увеличения стоимости получаются при $\xi = \psi$.



Таким образом получается, что «железо должно платить за отказ нести нагрузку» *, и законы распределения потерь и стоимостей перестают быть независимыми.

Установились названия «медная» и «железная» конструкции. В первой основная тяжесть расходов ложится на медь, во второй — на сталь. Так, например, высокочастотные машины имеют ничтожно малую затрату меди по сравнению с затратой стали.

Законы соразмерности обладают весьма замечательным свойством, позволяющим сделать следующие выводы: нарушение законов в достаточно широкой области не сильно сказывается на удорожании машины. Однако чем больше отступление от законов соразмерности, тем более возрастает стоимость машины, рис. 3.

Стремление экономить цветные металлы заставляет конструктора уменьшать затрату меди и, следовательно, нагружать медь сильнее. Так в масляных трансформаторах потери в меди превосходят потери в стали в 3 раза и более ($\xi = 3$).

При таких больших отклонениях $\xi$ от единицы сделать $\psi = \xi$ иногда невозможно, так как получаются чрезмерные плотности тока, не допустимые по нагреву. Поэтому часто берут $\psi \approx 1$ при $\xi = 3 - 4$. Отклонения от «идеальной» соразмерности наблюдаются и в ряде других случаев, особенно тогда, когда эти законы вступают в противоречие с требованиями экономики эксплуатации

Рис. 3. Влияния отступлений от $\xi = 1$ по Видмару.

Из формулы (58) видно, что, поскольку индукция стремится к пределу по нагреву и насыщению, а для величины $\xi$ и $\psi$ существуют оптимальные значения, плотность тока также стремится к определенному пределу. Этот же вывод следует и из условий нагрева, так как произведение $sB$ по этим условиям также стремится к пределу Но если выбрано отношение $\frac{s}{B}$ и произведение $sB$, то, таким образом, $s$ и $B$ получаются вполне определенными. Из условий минимума стоимости машины, как показано в гл. 2, можно найти «экономические» плотности тока и индукции. Однако в практике проектирования при выборе $s$ и $B$ целесообразно ориентироваться на данные построенных и хорошо работающих машин, так как общая методика определения экономических нагрузок является приближенной. Более точное определение экономических нагрузок и оптимальных геометрических размеров возможно лишь для конкретного типа машины путем расчета ряда вариантов и их детального анализа.

* По выражению М. Видмара [30].

## Глава вторая

# ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СОРАЗМЕРНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

## 2-1. ПОНЯТИЕ «ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ» ИЛИ ПОЛНЫХ ЗАТРАТ

Ограниченность законов «идеальной» соразмерности состоит в следующем.

Во-первых, эти законы, как уже было сказано, не учитывают требований эксплуатации, т. е. определенных рабочих свойств и характеристик машин. Между тем, размеры и их соотношения часто определяются именно этими свойствами.

Во-вторых, законы установлены в предположении заданных потерь и при этих заданных потерях определяют условия, при которых получится наиболее соразмерная или наиболее дешевая модель. Это будет модель, которая даст минимум производных веса и потерь.

Возникает вопрос: как именно установить эти заданные потери? Ясно, что не при любых заданных потерях может быть спроектирована дешевая и соразмерная машина данной мощности. Существует вполне определенная величина потерь, при которой машина данной мощности и скорости вращения будет наиболее экономичной. Другими словами, законы распределения стоимости материалов и законы распределения потерь должны быть дополнены единым законом о минимуме действительной стоимости машины.

Известно, что при проектировании линий передач соотношение стоимости проводниковых материалов и потерь в них выбирается также из условия минимума действительной стоимости. Этот минимум получается при равенстве стоимостей эквивалентных годовых потерь и суммы годовых отчислений, пропорциональных весу меди, т. е.

$$m_p s^2 \rho t_{\text{нг}} = m_V \varepsilon, \tag{1}$$

где

$m_p$ — стоимость единицы электроэнергии;

$s = \frac{I}{q}$ — среднеквадратичная плотность тока, соответствующая среднеквадратичной годовой мощности;

$t_{\text{нг}}$ — число часов работы в году;

$m_V$ — стоимость единицы объема проводов;

$\varepsilon$ — годовое погашение (амортизация) капиталовложений с учетом взносов на возобновление, ремонт, надзор и пр.

Действительно, к этой формуле легко прийти, если пренебречь увеличением стоимости станции вследствие потерь в линии.

Стоимость потерь в линии за период погашения $T = \frac{1}{\varepsilon}$ при заданной ее длине $L$ равна

$$M_p = I^2 \rho \frac{L}{q} m_p t_{\text{нг}} \frac{1}{\varepsilon}.$$

Стоимость материала проводов

$$M_m = m_V L q.$$

Произведение стоимостей

$$M_p \cdot M_m = I^2 \rho L^2 m_p m_V t_{\text{нг}} \frac{1}{\varepsilon} = \left(\frac{LP}{U}\right)^2 \rho m_p t_{\text{нг}} m_V \frac{1}{\varepsilon} = \text{const},$$

т. е. при заданной мощности $P$, напряжении $U$ и длине линии $L$ произведение стоимостей потерь и материала является постоянной величиной.

Очевидно, что при $M_p M_m = \text{const}$ суммарная стоимость $M = M_p + M_m$ получится минимальной при $M_p = M_m$, т. е. мы получаем формулу (1).

Из (1) получаем так называемую экономическую плотность тока

$$s_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{m_V \varepsilon}{m_p \rho t_{\text{нг}}}}. \tag{2}$$

В практике приходится отступать от $s_{\text{эк}}$ по ряду технических условий (нагрев, механические напряжения, стандартизация и пр.).

Определение $s_{\text{эк}}$ в машинах представляется более сложным. Прежде всего очевидно, что в электрической машине увеличение или уменьшение плотности тока приводит к уменьшению или увеличению расхода не только меди, но и изоляционных материалов, а также активной и конструктивной стали.

Должны быть приняты во внимание также следующие положения:

1) поскольку величина индукции имеет предел по насыщению, максимум к. п. д. получится при вполне определенных потерях в меди;

2) плотность тока во многих случаях лимитируется допустимым нагревом обмотки;

3) изменение потерь в меди вызывает изменение рабочих характеристик машины.

Рассмотрим прежде всего, что следует понимать под действительной стоимостью.

Действительной стоимостью будем называть выражение

$$M_m + k\Sigma' p = M_д, \tag{3}$$

где

$M_m$ — стоимость машины, выраженная через стоимость ее материалов;

$k\Sigma' p = M_p$ — стоимость условных потерь;

$k$ — коэффициент приведения этих стоимостей, определяемый ниже.

Основная часть стоимости машины определяется стоимостью активных и конструктивных материалов (вместе с изоляцией). Поскольку нашей задачей является установление *приближенной закономерности*, можно стоимость машины выразить через стоимость какого-либо вида материалов. Выберем в качестве такого измерителя *обмоточную медь* (или алюминий) якоря вместе с проводниковой и витковой изоляцией.

Другие материалы, как, например, активная сталь или конструктивные материалы вместе с корпусной изоляцией, могут быть либо независимыми от расхода меди (алюминия), либо зависеть частично. Практически почти всегда при увеличении расхода на обмотку приходится увеличивать расход активной стали и части конструктивных материалов и, наоборот, при уменьшении расхода на обмотку снижаются и другие расходы. Стоимость производства $M_{пр}$ также зависит от стоимости обмотки. В итоге мы приходим к упрощенному выражению стоимости машины как некоторой условной стоимости материалов

$$M_m = G_{Cu_1}m'_{Cu_1} + G_{Cu_2}m'_{Cu_2} + G_{Fe_1}m'_{Fe_1} + G_{Fe_2}m'_{Fe_2} + G_к m'_к + M_{пр} = \\ = M_{Cu_1} + M_{Cu_2} + M_{Fe_1} + M_{Fe_2} + M_к + M_{пр}, \tag{4}$$

где

$G_{Cu_1}$, $G_{Cu_2}$ — вес меди обмотки первичного и вторичного якоря;

$m'_{Cu_1}$, $m'_{Cu_2}$ — стоимости единицы веса обмоточного провода данной марки, с учетом стоимости проводниковой и витковой изоляции в части, пропорциональной расходу меди;

$G_{Fe_1}$, $G_{Fe_2}$, $M_{Fe_1}$, $M_{Fe_2}$ — веса́ и стоимости активного железа первичного и вторичного якоря;

$m'_{Fe_1}$, $m'_{Fe_2}$ — стоимости единицы веса стали с учетом обработки, лакировки, сборки и пр.;

$G_к m'_к = M_к$ — стоимость конструктивных материалов и полуфабрикатов с включением корпусной изоляции.

Стоимость материалов представляет единовременную затрату. Стоимость потерь $M_p$ распределена на весь период амортизации или срок окупаемости $T$

$$M = [(p_{Cu_1} + p_{Cu_2})\, t_{нг} m_p + (p_{Fe} + p_0)\, t_{ог} m_{ро}]\, T = k\Sigma' p. \tag{5}$$



где

$m_p$, $m_{ро}$ — стоимости единицы потерь электроэнергии (нагрузочных и постоянных). Из (5) следует, что

$$\Sigma' p = \left[p_{Cu_1} + p_{Cu_2} + (p_{Fe_1} + p_0)\frac{t'_{ог}}{t_{нг}}\right]; \quad t'_{ог} = t_{ог}\frac{m_{ро}}{m_p}; \tag{6}$$

$$k = m_p t_{нг} T = \frac{m_p t_{нг}}{\varepsilon}. \tag{7}$$

Величина $k$ представляет, таким образом, стоимость потерянного киловатта за период окупаемости. Эквивалентное число годовых часов потерь в меди $t_{нг}$ и потерь холостого хода $t_{ог}$ при переменных графиках нагрузки могут быть определены из условий равенства потерь

$$(p_{FeN} + p_{0N})\, t_{ог} = \int_0^{t_г} [p_{Fe}(t) + p_0(t)]\, dt, \text{ т. е. при } U = \text{const},\ t_{ог} \approx t_г; \tag{8}$$

$$p_{CuN} t_{нг} = \int_0^{t_г} p_{Cu}(t)\, dt \tag{8а}$$

или, поскольку потери в меди при $U = \text{const}$ пропорциональны $P^2$,

$$t_{нг} = t_г \frac{P^2_{эф}}{P^2_N}, \tag{8б}$$

где

$t_г$ — число часов использования машины в году;

$P_{эф}$ — среднеквадратичная мощность, потребляемая или отдаваемая машиной при данном графике нагрузки;

$P_N$ — номинальная мощность.

Выражение (3) должно иметь минимум, так как при увеличении потерь в машине заданной мощности расход материалов будет уменьшаться.

Пусть мы имеем хорошо спроектированную машину определенной мощности, удовлетворяющую всем поставленным техническим требованиям § 1-8, и пусть ее геометрические соотношения выбраны оптимальными. При этом мы можем составить уравнение ее действительной стоимости по уравнению (3) и произвести ее вариацию по какой-либо переменной, например по стоимости обмотки якоря $M_{Cu}$. При заданной мощности произведе́ние полного тока и полного магнитного потока должно быть постоянным (§ 1-4). Отношение этих величин желательно также сохранить постоянным из условий эксплуатационных характеристик. Поэтому при вариации стоимостей и потерь желательно принять полный ток и полный магнитный поток неизменными. При этом плотность тока и индукция будут равны:

$$s = \frac{I_п}{S_{Cu}}; \quad B = \frac{\Phi_п}{S_{Fe}},$$

где

$I_п$ и $\Phi_п$ — полный ток и полный магнитный поток;
$S_{Cu}$ и $S_{Fe}$ — общие сечения меди и железа якоря.

Потери в меди и в стали зубцов будут изменяться по закону

$$p_{Cu_1} = s^2 k_{Cu} G_{Cu_1} = \frac{I_п^2}{S_{Cu_1}^2} k_{Cu} G_{Cu_1};$$

$$p_{Fe} = B^2 k_{Fe} G_{Fe_1} = \frac{\Phi_п^2}{S_{Fe}^2} k_{Fe} G_{Fe_1}.$$

Так как

$$G_{Cu_1} = \gamma_{Cu} S_{Cu_1} \cdot 0{,}5 l_{w_1}, \text{ а } G_{Fe} = \gamma_{Fe} S_{Fe} l_{Fe},$$

где

$l_{w_1}$ — длина витка и $l_{Fe}$ — длина железа, то

$$\left.\begin{aligned} p_{Cu_1} &= k'_{Cu} \frac{(0{,}5 \cdot l_{w_1})^2}{G_{Cu_1}} \\ p_{Fe} &= k'_{Fe} \frac{l_{Fe}^2}{G_{Fe}} \end{aligned}\right\}, \tag{9}$$

где

$$k'_{Cu} = k_{Cu} I_п^2 \gamma_{Cu}^2 = \text{const}; \quad k'_{Fe} = k_{Fe} \Phi_п^2 \gamma_{Fe}^2 = \text{const}.$$

При неизменной длине машины согласно (9)

$$\left.\begin{aligned} p_{Cu_1} G_{Cu_1} &= \text{const} \text{ или } p_{Cu_1} M_{Cu_1} = C_1 = \text{const} \\ p_{Fe_1} G_{Fe_1} &= \text{const} \text{ или } p_{Fe_1} M_{Fe_1} = C_2 = \text{const} \end{aligned}\right\}, \tag{10}$$

т. е. получается «гипербола стоимости» (степени $n = 1$).

Дифференцируя выражение (3) по $M_{Cu_1}$, получим

$$\frac{\partial M_д}{\partial M_{Cu_1}} = \frac{\partial M_m}{\partial M_{Cu_1}} + k \frac{\partial \Sigma' p}{\partial M_{Cu_1}}. \tag{11}$$

Согласно (4) можно видеть, что если расход других материалов не зависит от расхода меди, то

$$\frac{\partial M_m}{\partial M_{Cu_1}} = 1. \tag{12}$$

Если же определенная часть $\alpha_m$ расхода других материалов пропорциональна расходу меди, то

$$\frac{\partial M_m}{\partial M_{Cu_1}} = 1 + \alpha_m. \tag{12a}$$

Подробный анализ показывает, что можно положить

$$\alpha_m \approx a_{i_1} = \frac{{}^2/_3 M_{\kappa i} + M'_\kappa}{M_{Cu_1}},$$

где

$M_{\kappa i}$ — стоимость корпусной изоляции;
$M'_\kappa$ — часть стоимости конструктивных материалов, пропорциональная $M_{Cu_1}$.



Если при изменении стоимости обмотки изменяются только ее потери, а прочие потери остаются неизменными, то по (6) получим

$$\frac{\partial \Sigma' p}{\partial M_{Cu_1}} = \frac{\partial p_{Cu_1}}{\partial M_{Cu_1}}. \tag{13}$$

Если же определенная часть других потерь $\alpha_p$ принимается пропорциональной потерям меди якоря, то

$$\frac{\partial \Sigma' p}{\partial M_{Cu_1}} = \frac{\partial p_{Cu_1}}{\partial M_{Cu_1}} (1 + \alpha_p). \tag{13a}$$

Согласно (10) получаем

$$p_{Cu_1} = \frac{C_1}{M_{Cu_1}} \quad \text{и} \quad \frac{\partial p_{Cu_1}}{\partial M_{Cu_1}} = -\frac{C_1}{M_{Cu_1}^2}. \tag{14}$$

Если теперь приравнять нулю выражение (11) и воспользоваться (12) и (13), то получим

$$1 - k \frac{C_1}{M_{Cu_1}^2} = 0 \quad \text{или} \quad M_{Cu_1} = k \frac{C_1}{M_{Cu_1}} = k p_{Cu_1}, \tag{15}$$

т. е. действительная стоимость будет минимальной, когда стоимость обмотки равна стоимости потерь в ней.

Если пользоваться выражениями (12а) и (13а), то

$$M_{Cu_1}(1 + \alpha_m) = k p_{Cu_1} (1 + \alpha_p). \tag{16}$$

### 2-2. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТЬ ТОКА И ИНДУКЦИЯ

Из полученных выражений следует, что при минимуме стоимости

$$m'_{Cu}(1 + \alpha_m) = k s^2 k_{Cu} (1 + \alpha_p), \tag{17}$$

а удельные потери в меди

$$s^2 k_{Cu} = \frac{(1 + \alpha_m) m'_{Cu}}{k (1 + \alpha_p)} \ \textit{вт/кг}.$$

При $\alpha_m = \alpha_p$ (в частности, при $\alpha_m = \alpha_p = 0$)

$$s^2 k_{Cu} = \frac{m'_{Cu}}{k} \ \textit{вт/кг}$$

и экономическая плотность тока

$$s_{эк} = \sqrt{\frac{m'_{Cu}}{k \cdot k_{Cu}}} \ \textit{а/см}^2. \tag{18}$$

Следовательно, удельные потери должны быть прямо пропорциональны стоимости единицы веса обмотки и обратно пропорциональны эквиваленту $k$. Последний по (7) пропорционален произведению стоимости нагрузочных потерь электроэнергии $m_p$ на полное число часов нагрузки за период окупаемости. Например, при $m'_{Cu} = 30$ *руб/кг* $m_p = 0{,}08$ *руб/квт-час*, $\varepsilon = 0{,}125$, $t_{нг} = 2000$ часов в год

$$k = \frac{0{,}08 \cdot 2000}{0{,}125} = 1280 \ \textit{руб/квт}$$

и

$$s^2 k_{Cu} = \frac{30}{1280} \cdot 1000 = 22{,}4 \ \textit{вт/кг}; \quad s = \sqrt{\frac{22{,}4}{2{,}25 \cdot 10^{-4}}} = 316 \ \textit{а/см}^2,$$

или $3{,}16$ *а/мм²*.

Если при вариации все размеры активных материалов предположить изменяющимися пропорционально, то в соответствии с (9) потери изменяются обратно пропорционально первой степени линейных размеров, а стоимость меди — прямо пропорционально кубу линейных размеров. В результате

$$p_{Cu_1} = C_1' (M_{Cu_1})^{-1/3}, \qquad (19)$$

где $C_1' = \text{const}$, т. е. гипербола стоимости степени $n = 1/3$. Вместо (14) получим

$$\frac{\partial p_{Cu_1}}{\partial M_{Cu_1}} = -C_1' \frac{1}{3} (M_{Cu_1})^{-4/3}. \qquad (20)$$

Приравнивая нулю правую часть уравнения (11), получим

$$k\left[(1 + \alpha_p) C_1' \frac{1}{3} M_{Cu_1}^{-4/3}\right] = 1 + \alpha_m,$$

откуда, учитывая (19), имеем

$$k (1 + \alpha_p) p_{Cu_1} = 3M_{Cu_1} (1 + \alpha_m), \qquad (20a)$$

т. е. стоимость потерь равна утроенной стоимости материалов. При этом вместо (18) получим экономическую плотность тока в виде

$$s_{эк} = \sqrt{\frac{3m_{Cu}' (1 + \alpha_m)}{k (1 + \alpha_p)}}. \qquad (18a)$$

При $\alpha_m = 0$ и $\alpha_p = 0$

$$s_{эк} = \sqrt{\frac{3m_{Cu}'}{k}}. \qquad (18б)$$

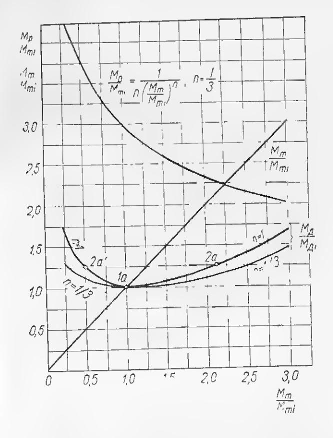
В проектной практике плотность тока обычно выбирается из условий нагрева и ряда других технических условий. Пределы плотностей тока даны в главах 9, 10, 11 и 12, посвященных методике проектирования различных типов машин. При высокой стоимости высоковольтной корпусной изоляции по (18a) может получиться недопустимая по нагреву величина $s_{эк}$. В этом случае необходимо выбирать $s$ по нагреву или повысить интенсивность теплоотдачи. Приведенная методика определения экономической плотности тока позволяет приближенно учесть лишь дополнительные условия, налагаемые экономикой.

Экономическая индукция найдется из условий, рассмотренных в § 1-9. Подставив в формулу (58) оптимальные отношения $\xi$ и $\psi$, а в качестве $s$ величину $s_{эк}$, получим значение $B_{эк}$. Пределы практически применяемых индукций даны в главах 9, 10, 11 и 12.

Возникает вопрос: как велико влияние отступлений от экономических плотностей тока? На рис. 4 даны кривые, показывающие изменение стоимостей материалов и потерь по отношению к их оптимальным значениям. При этом взяты оба показателя «гиперболы стоимости» $n = 1$ и $n = \frac{1}{3}$. На этом же рисунке представлены кривые изменения действительной стоимости, из которых видно, что отступление от идеальных соотношений на 100% приводит к увеличению стоимости не больше, чем на 20%.



Наиболее эффективным путем снижения стоимости современных машин является не столько отыскание относительного минимума затрат, сколько изыскание путей абсолютного снижения отдельных видов затрат (применение новых материалов, более совершенной технологии, систем охлаждения и пр.) и перехода на кривые с меньшим значением минимума, как показано на рис. 5.




…с. 4. Изменение относительной действительной стоимости.

Точность экономических расчетов зависит от точности определения $m_{Cu}$, $m_p$, $t_{нг}$ и $\varepsilon = \frac{1}{T}$. Способ определения $m_{Cu}'$ был показан выше. Определение стоимости потерь $m_p$ зависит от того, в какой части электрической системы имеют место потери. Для турбо- и гидрогенераторов электростанций $m_p$ равно стоимости энергии на электростанции с учетом погашения вложений (от 6 до 8 *коп/квт-час*), для электродвигателей и трансформаторов $m_p$, вероятно, близко к отпускной цене элект-

роэнергии (в пределах 20—30 *коп/квт-час* и выше). При определении $T$ принимают срок от 8 до 10 лет ($\varepsilon = 0{,}1$; 0,125). Однако, по-видимому, нельзя его принимать постоянным для всех типов машин, и этот вопрос требует дальнейшего исследования. Сложность точного определения всех этих величин состоит не только в том, что они зависят от существующих (не всегда стабильных) разнообразных цен, неопределенных графиков нагрузки и неточностей в определении срока окупаемости, но также в том, что в экономических расчетах необходим учет динамики стоимостей, дефицитности отдельных материалов, эффекта от экономии материалов, предвидение направлений технического развития и пр. Поэтому экономический расчет посредством одной формулы с введением различных коэффициентов может привести к неверным экономическим решениям. Необходим в каждом случае конкретный анализ ряда расчетных вариантов и учет множества факторов и зависимостей, что можно сделать только применением счетно-решающих устройств.

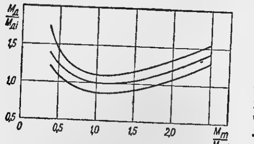



Рис. 5. Изменение относительной действительной стоимости при различных значениях минимумов.

Можно считать установившимся метод экономических расчетов, основанный на сравнении увеличения себестоимости машины $C$ и годовой экономии $Э$ на текущих затратах. Предположим, что данный конструктивный вариант имеет годовую экономию на текущих затратах, равную $Э$ руб., но при этом себестоимость машины возрастает на $C$ руб. Целесообразность этой экономии получится при условии

$$\frac{C}{Э} \leqslant T.$$

Легко убедиться, что полученное условие эквивалентно (11) — (15), так как

$$C = \Delta M_m, \text{ а } Э = \Delta M_p = m_p t_{\text{нг}} \Delta p_{\text{Cu}_1}.$$

### 2-3. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ К. П. Д.

Сумма основных электромагнитных потерь в якоре машины равна

$$\Sigma p'_э = p_{\text{Cu}} + p_{\text{Fe}} = p_{\text{Cu п}}(1 + k_1\beta) + p_z(1 + k_{pj}), \tag{21}$$

где

$p_{\text{Cu п}}$ — потери в меди на длине пазов;
$k_1\beta$ — относительная длина лобовой части;
$p_z$ — потери в зубцах;
$k_{pj}$ — отношение потерь в ярме к потерям в зубцах.



Далее, принимая во внимание (26) и (27) гл. 1, имеем:

$$\left.\begin{aligned} p_{\text{Cu п}} &= sA\rho\pi Dl = s^2\rho h_{\text{п}}\lambda\varphi_{\text{Cu}}\pi Dl \\ p_z &= B^2 c_{\text{Fe}} h_{\text{п}}\zeta\varphi_{\text{Fe}}\pi Dl \end{aligned}\right\}. \tag{21a}$$

Здесь $B$ — среднеквадратичная индукция в зубцах;
$c_{\text{Fe}} = k_{\text{Fe}}\gamma_{\text{Fe}}$ — постоянная потерь [см. (51) гл. 1].

Из уравнения (36) гл. 1 и (21) получаем

$$\frac{p_{\text{Cu п}}}{P} = \frac{s^2\rho h_{\text{п}}\lambda\varphi_{\text{Cu}}\pi Dl}{2pf\sqrt{2}k_w\tau^3 l k_\varphi \frac{h_{\text{п}}}{\tau} sB} = \frac{\rho\lambda\varphi_{\text{Cu}} s}{f\sqrt{2}k_w k_\varphi \tau B} \tag{22}$$

или

$$\frac{p_{\text{Cu п}}}{P} = \frac{s\rho}{f\sqrt{2}k_w B_{\delta_1}\tau}. \tag{22a}$$

По уравнению (59) гл. 1 применительно к машинам

$$\frac{s}{B} = \sqrt{\xi \frac{c_{\text{Fe}}}{\rho} \frac{\zeta\varphi_{\text{Fe}}}{\lambda\varphi_{\text{Cu}}}}, \tag{23}$$

где $\xi = \dfrac{p_{\text{Cu п}}}{p_{\text{Fe}\,z}}$.

Подставляя (23) в (22), получаем

$$\frac{p_{\text{Cu п}}}{P} = \frac{1}{f\sqrt{2}k_w}\sqrt{\xi \frac{c_{\text{Fe}}\varrho}{k_\varphi} \frac{1}{\tau}}. \tag{24}$$

Относительные потери в железе якоря по (21) получаются равными

$$\frac{p_z + p_j}{P} = \frac{B^2 c_{\text{Fe}}\zeta\varphi_{\text{Fe}}(1 + k_{pj})}{\sqrt{2}fk_w k_\varphi sB\tau},$$

где $k_{pj} = \dfrac{p_j}{p_z}$ — отношение потерь в ярме к потерям в зубцах.

Аналогичные выражения получатся для потерь во вторичном якоре. Вводя в (22) выражение для $\tau$ по (38) гл. 1 и учитывая (21), получим суммарные относительные электромагнитные потери

$$\frac{\Sigma p_э}{P} = k_э\left(\frac{2p}{P}\right)^{1/4}, \tag{25}$$

где

$$k_э = \frac{\lambda_1^{1/4}\beta^{-1/4}}{(\sqrt{2}fk_w k_\varphi sB)^{3/4}}[s^2\rho\lambda\varphi_{\text{Cu}}(1 + k_1\beta)(1 + a_{21}) +$$
$$+ B^2 c_{\text{Fe}}\zeta\varphi_{\text{Fe}}(1 + k_{pj})(1 + b_{21})].$$

При этом потери в меди и в железе ротора учтены коэффициентами $a_{21}$ и $b_{21}$, а дополнительные потери меди увеличенным значением $\rho$.

Если подставить в выражение $k_э$ экономические значения $s_{эк}$ и $B_{эк}$, найденные выше, и оптимальные значения коэффициентов $\lambda_1$, $\beta$, $k_\varphi$ и т. д., то получим по (25) экономические относительные



4*

потери, а значит и экономический к. п. д. по учтенным электромагнитным потерям.

Выражение (25), кроме того, позволяет определить значение экономической плотности тока. Легко видеть, что выражение для коэффициента $k_э$ имеет минимум для данного значения индукции $B$. Задаваясь предельной по насыщению и нагреву железа величиной индукции, получим

$$k_э \equiv as^{5/4} + bs^{-3/4};\qquad (25а)$$
$$a = \rho\lambda\varphi_{Cu}(1 + k_1\beta)(1 + a_{21});$$
$$b = B^2 c_{Fe}\zeta\varphi_{Fe}(1 + k_{pj})(1 + b_{21}).$$

Дифференцирование по $s$ дает

$$as^2 = \frac{3}{5} b$$

или

$$s = s_0 = \sqrt{\frac{3}{5}\frac{b}{a}} = B\sqrt{\frac{3}{5}\frac{c_{Fe}\zeta\varphi_{Fe}(1 + k_{pj})(1 + b_{21})}{\rho\lambda\varphi_{Cu}(1 + k_1\beta)(1 + a_{21})}}.\qquad (26)$$

Например, при $p_{10} = 1{,}6$ *вт/кг*, учитывая увеличение потерь вследствие обработки и дополнительных потерь коэффициентом 1,84 и принимая удельный вес стали $7{,}6 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*³, получим $c_{Fe} = p_{10} \cdot 10^8 \gamma_{Fe} \cdot 1{,}84 = 1{,}6 \cdot 1{,}84 \cdot 10^8 \cdot 7{,}6 \times 10^{-3} = 22{,}4 \cdot 10^5$. Принимая $\lambda = \zeta = 0{,}5$; $\varphi_{Cu} \approx 0{,}4$; $\varphi_{Fe} \approx 0{,}8$; $k_{pj} = 1$; $a_{21} = b_{21} = 1$; $k_1\beta = 1$; $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$, получим

$$s_0 = B\sqrt{\frac{3}{5} \cdot \frac{22{,}4 \cdot 10^5 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 \cdot 2 \cdot 2}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 2 \cdot 2}} = 1{,}16 \cdot 10^6 B.$$

Если принять предельную индукцию в зубцах $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*² (17 000 *гс*), то получим

$$s_0 = 197\ а/см^2, \text{ или } s_0 = 1{,}97\ а/мм^2.$$

В практике такая плотность тока выбирается при затрудненных условиях охлаждения. Наиболее часто употребляемая плотность тока в широком диапазоне мощностей находится в пределах 3 — 5 *а/мм*², а в малых машинах или в машинах с форсированным охлаждением достигает 8 — 10 *а/мм*² и выше. При этом получается меньшая затрата материалов при достаточно высоком к. п. д. Действительно, относительная затрата материалов по (36) и (46), гл. 1 изменяется по закону

$$\frac{M_m}{P} = \left(\frac{2p}{P}\right)^{1/4} \frac{k_3}{(sB)^{3/4}},\qquad (27)$$

где $k_3 = \text{const}$, которую можно определить из (52), стр. 63.

Минимум действительной стоимости (§ 2-1), очевидно, получится при более высокой плотности тока

$$\frac{M_д}{P} \equiv \left(\frac{2p}{P}\right)^{1/4} \left[\frac{1}{(sB)^{3/4}} + k_2(as^{5/4} + bs^{-3/4})\right],\qquad (27а)$$

где $k_2$ — постоянная, включающая коэффициент $\boldsymbol{k}$ приведения стоимости материалов к стоимости потерь.

В выражении (25) не приняты во внимание механические потери. При увеличении нагрузок и уменьшении веса ротора механические потери уменьшаются. Учет этих потерь приведет к возрастанию постоянной величины $b$; последняя тогда будет учитывать не только потери в железе статора и железе ротора, но и определенную часть механических потерь.

Уравнение (27а) можно записать в относительных единицах. Примем за единицу плотности тока $s$ плотность по уравнению (26). Стоимость материалов при $B = \text{const}$ по (27) будет пропорциональна

$$\frac{M_m}{P} \equiv \left(\frac{s}{s_0}\right)^{-3/4},$$



а относительная стоимость электромагнитных потерь

$$\frac{\Sigma' p_э}{P} \equiv \left[\left(\frac{s}{s_0}\right)^{5/4} + \alpha\left(\frac{s}{s_0}\right)^{-3/4}\right]\frac{1}{1+\alpha},$$

где $\alpha$ — отношение постоянных потерь к переменным, умноженное на $\frac{t_{oг} m_{po}}{t_{нг} m_p}$ при $s = s_0$; ($\alpha = 1 \div 2$). Принимая во внимание (27а), получим

$$\frac{M_д}{P} \equiv \left(\frac{s}{s_0}\right)^{-3/4} + c\left[\left(\frac{s}{s_0}\right)^{5/4} + \alpha\left(\frac{s}{s_0}\right)^{-3/4}\right]\frac{1}{1+\alpha},\qquad (27б)$$

где постоянная $c$ равна отношению стоимости потерь к стоимости материалов при $s = s_0$ ($c \approx 1 \div 2$).

Плотность тока, соответствующая минимуму $\frac{M_д}{P}$ из уравнения (27б),

$$\frac{s}{s_0} = \sqrt{\frac{3}{5}\left(\alpha + \frac{1+\alpha}{c}\right)}.\qquad (28)$$

При $c = 2$ и $\alpha = 1$ $\quad \frac{s}{s_0} \approx 1{,}1.$

При $c = 1$ и $\alpha = 1$ $\quad \frac{s}{s_0} \approx 1{,}34.$

На рис. 6 представлено изменение относительных стоимостей материалов [1-й член уравнения (27б)] и потерь [2-й член уравнения (27б)] при $B = \text{const}$, $s = \text{var}$, а также суммарная действительная стоимость в относительных единицах. Величина $c$ положена равной единице.

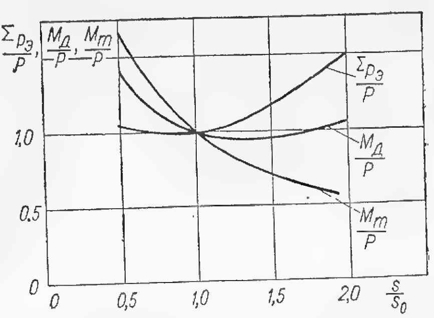


Рис. 6. Изменение стоимости материалов и потерь в функции плотности тока.

Как видно, минимум стоимости получается при более высокой плотности тока. Повышение плотности тока оказывается выгодным, когда постоянные потери больше переменных и когда увеличение переменных потерь приводит к возрастанию мощности данного габарита. Например, в мощных турбо- и гидрогенераторах с форсированным охлаждением выгодно увеличить плотность тока. За счет этого возрастает мощность машины в единице, и некоторое снижение ее к. п. д. окупается увеличением к. п. д. всего агрегата. Из формул (26) и (27) также следует, что экономическая плотность тока для малых машин и микромашин может быть увеличена, так как эти машины имеют меньшее значение эквивалента $\boldsymbol{k}$ и коэффициента $c$ вследствие меньшего числа часов работы с номинальной мощностью.

Коэффициент пропорциональности $k_э$ уравнения (25) при постоянной температуре обмотки около 100°С изменяется в узких пределах, оставаясь близким к единице, если $P$ выражено в ваттах. Таким образом, экономический к. п. д. по электромагнитным потерям для машин близок к величине

$$\eta_э = 1 - k_э\left(\frac{\Sigma p_э}{P}\right) \approx 1 - \left(\frac{2p}{P}\right)^{1/4}.\qquad (29)$$

В указанную формулу не входят механические и добавочные потери *. Согласно [85] механические потери пропорциональны мощности на полюс в некоторой степени $m$ и зависят от мощности и скорости вращения, а добавочные — обратно пропорциональны мощности на полюс в степени $m_1 < 1$, т. е.

$$\eta = 1 - k_э \left(\frac{2p}{P}\right)^{1/4} - k_m \left(\frac{P}{2p}\right)^m - k_д \left(\frac{P}{2p}\right)^{-m_1}. \qquad (29а)$$

Для крупных машин $m \approx 1$. Коэффициент $k_m$ зависит от конструктивного типа машины, системы вентиляции, типа подшипников, системы смазки и т. д. Величина $k_m \left(\frac{P}{2p}\right)^m$ по данным опыта составляет от 0,5 до 1,5% от $P$.

Добавочные потери, согласно нормам, должны находиться приблизительно в тех же пределах, но изменяются они по другому закону, а именно: в крупных машинах они должны составлять меньший процент, чем в средних и мелких. Согласно [102] добавочные потери для машины до 100 *квт* составляют 1% $P$; от 100 до 1000 *квт* — 0,5% $P$ и свыше 1000 *квт* — (0,25 — 0,4)% $P$. Коэффициент $k_д$ в (29а) зависит от типа машины.

Проверка показывает, что реальные значения к. п. д. близко соответствуют формулам (29) и (29а).

В трансформаторах имеют место только электромагнитные потери, изменяющиеся по аналогичному закону, т. е.

$$\frac{\Sigma p_э}{P} = k_э \left(\frac{1}{P}\right)^{1/4}. \qquad (30)$$

Постоянная $k_э$ может быть определена из формул (19б) и (50) гл. 1.

Так как веса меди и железа пропорциональны кубу диаметра стержня $D$, а мощность пропорциональна $D^4$, то относительные потери

$$\frac{\Sigma p_э}{P} = C_p \frac{s^2 k_{Cu} + \psi_1 B^2 k_{Fe}}{(sB)^{3/4}} \left(\frac{1}{P}\right)^{1/4}, \qquad (30а)$$

где

$$\psi_1 = \frac{G_{Fe}}{G_{Cu}} = \frac{M_{Fe}}{M_{Cu}} \frac{m_{Cu}}{m_{Fe}} = \psi \frac{m_{Cu}}{m_{Fe}};$$

$\psi = \frac{M_{Fe}}{M_{Cu}}$ — отношение стоимостей железа и меди ($\psi \approx 1$);

$C_p = \text{const}$.

Подставляя в (30а) экономическую плотность тока и индукцию, найденную по (26) или по (18), получим экономические относительные потери, а следовательно, и экономический к. п. д. трансформатора. Постоянная $C_p$ зависит от геометрических соотношений и коэффициентов заполнения. Ее оптимальное значение может быть найдено, как показано в гл. 9.

* Для многополюсных машин ($2p > 16$) формула (29) дает близкие значения к полному к. п. д. с учетом всех потерь.



Анализ коэффициента пропорциональности показывает, что если исходить из одновременного требования минимума действительной стоимости и предельной температуры по нормам, то его величина должна изменяться в пределах:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| для | мощности | до 5 *ква* | $k_э = 0{,}45 - 0{,}5$ |
| » | » | » 100 *ква* | $k_э = 0{,}5 - 0{,}55$ |
| » | » | » 1000 *ква* | $k_э = 0{,}6 - 0{,}65$ |
| » | » | свыше 1000 *ква* | $k_э = 0{,}7 - 0{,}75$ |

Причина повышения коэффициента $k_э$ заключается в том, что с ростом мощности и увеличением интенсивности теплоотдачи, удельные нагрузки $s$ и $B$ несколько возрастают.

Точное определение экономического к. п. д. и экономических нагрузок для данной конкретной машины следует признать невозможным. Этот к. п. д. должен соответствовать минимуму действительной стоимости машины. Нахождение такого минимума может быть лишь в результате постепенных приближений на основе учета многочисленных (иногда конъюнктурных) соображений.

Практические значения экономического к. п. д. для нормальных серий электрических машин и трансформаторов можно считать близкими к тем значениям, которые установлены практикой современного электромашиностроения. Эти значения к. п. д. приводятся в гл. 9, 10, 11 и 12.

В ходе технического развития отдельных областей промышленности и энергетики, поисков новых материалов, новых источников энергии, новых способов электропередачи экономический к. п. д. отдельных типов машин должен изменяться, однако сколько-нибудь существенное понижение **общего уровня** к. п. д. и получение за этот счет экономии материалов, по-видимому, не может быть допустимо.

## 2-4. УНИВЕРСАЛЬНАЯ МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ

Известная машинная постоянная Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 l_i n}{P} = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_w} \cdot \frac{1}{B_\delta A}. \qquad (31)$$

Эта «постоянная» на самом деле изменяется в весьма широких пределах с мощностью машины, так как с ростом мощности удельные нагрузки $B_\delta$ и $A$ растут.

Поэтому пользование формулой (31) для целей расчета удобно только в тех случаях, когда имеются кривые машинных постоянных для близких по типу построенных машин, но и при этом, однако, до производства окончательного расчета машины остается скрытым, в какой мере возможны те или иные отступления от опытных кривых.

Можно найти такую постоянную, которая, во-первых, изменяется незначительно в широких пределах мощностей и типов машин и, во-вторых, выражается через основные коэффициенты

§ (1-6), важные с точки зрения экономических и эксплуатационных показателей машины и имеющие «оптимальные значения».

Универсальная машинная постоянная статора $C_s$ может быть определена из уравнения (38) гл. 1 в виде

$$C_s = \tau \sqrt[4]{\frac{2p\lambda_1 \sqrt{2} f}{P\beta}} = \frac{1}{(k_w k_\varphi s B)^{1/4}}. \qquad (32)$$

Как будет показано ниже,

$$C_s \to \text{const}.$$

В табл. 2 дана сводка величин $C_s$ для построенных машин.

*Таблица 2*

**Универсальная постоянная и основные коэффициенты машин переменного тока**

| $P$ (в *квт*) | $n$ (об/мин) | $\tau$ (в *см*) | $l_i$ (в *см*) | $\beta = \frac{\tau}{l_i}$ | $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$ | $\lambda = \frac{b_п}{t_1}$ | $C_s$ (в $\frac{см}{дж^{1/4}}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Турбогенераторы | | | | |
| 1 500 | 3000 | 94,2 | 100 | 0,942 | 0,069 | 0,491 | 4,80 |
| 6 000 | 3000 | 120,0 | 140 | 0,860 | 0,083 | 0,541 | 4,66 |
| 12 000 | 3000 | 136,5 | 175 | 0.780 | 0,099 | 0,640 | 4,72 |
| 30 000 | 3000 | 136,5 | 270 | 0,563 | 0,124 | 0,455 | 4,10 |
| 50 000 | 3000 | 169,0 | 310 | 0,610 | 0,109 | 0,470 | 4,25 |
| 100 000 | 3000 | 172,0 | 525 | 0,365 | 0,134 | 0,415 | 4,40 |
| 150 000 | 3000 | 188,5 | 625 | 0,331 | 0,122 | 0,470 | 4,45 |
| 200 000 | 3000 | 191,5 | 545 | 0,380 | 0,130 | 0,496 | 4,05 |
| | | | Синхронные явнополюсные машины | | | | |
| 64 | 1000,0 | 21,2 | 19 | 1,210 | 0,148 | 0,433 | 3,56 |
| 120 | 750,0 | 19,1 | 35 | 0,590 | 0,178 | 0,360 | 3,85 |
| 240 | 600,0 | 20,4 | 34 | 0,670 | 0,227 | 0,360 | 3,42 |
| 450 | 500,0 | 24,1 | 41 | 0,640 | 0,253 | 0,450 | 3,77 |
| 615 | 300,0 | 22,2 | 29 | 0,840 | 0,330 | 0,390 | 3,64 |
| 1 380 | 1000,0 | 50,5 | 39 | 1,420 | 0,168 | 0,400 | 3,65 |
| 4 600 | 500,0 | 43,5 | 74 | 0,650 | 0,250 | 0,400 | 3,76 |
| 8 750 | 75,0 | 31,4 | 72 | 0,436 | 0,384 | 0,392 | 3,80 |
| 15 000 | 166,7 | 43,6 | 80 | 0,545 | 0,287 | 0,482 | 4,50 |
| 20 000 | 150,0 | 40,4 | 125 | 0,356 | 0,328 | 0,448 | 4,15 |
| 32 000 | 1000,0 | 41,7 | 120 | 0,380 | 0,316 | 0,405 | 4,05 |
| 57 200 | 62,5 | 42,3 | 150 | 0,308 | 0,283 | 0,445 | 4,10 |
| 83 500 | 83,3 | 48.0 | 180 | 0,290 | 0,336 | 0,387 | 4,16 |
| | | | Асинхронные двигатели | | | | |
| 0,6 | 1410 | 7,00 | 6,4 | 1,090 | 0,220 | 0,700 | 3,38 |
| 1,7 | 2820 | 12,80 | 10,0 | 1,280 | 0,100 | 0,680 | 3,34 |
| 4,5 | 960 | 7,95 | 14,0 | 0,567 | 0,310 | 0,675 | 3,44 |
| 10,0 | 730 | 10,20 | 10,0 | 1,020 | 0,302 | 0,626 | 3,32 |
| 20,0 | 2840 | 28,30 | 10,0 | 2,830 | 0,110 | 0,635 | 3,43 |
| 40,0 | 730 | 13,70 | 16.0 | 0,860 | 0,278 | 0,630 | 3,32 |
| 75,0 | 1460 | 24,70 | 16,0 | 1.550 | 0,174 | 0,680 | 3,37 |
| 130,0 | 2940 | 44,80 | 22,0 | 2,040 | 0,098 | 0,600 | 3.66 |
| 250,0 | 495 | 19,60 | 44,0 | 0,490 | 0,365 | 0,500 | 4,05 |
| 400,0 | 495 | 19.60 | 64,0 | 0,340 | 0,365 | 0,450 | 3,94 |
| 1250,0 | 1460 | 50,20 | 44,0 | 1,250 | 0,145 | 0,400 | 3,80 |



Из табл. 2 можно видеть, что для всех этих разнообразных по типу, мощности и скорости вращения машин $C_s$ колеблется в пределах 3,3÷4,8 $см/дж^{1/4}$.

В некоторых случаях размеры машины более правильно определяются по универсальной постоянной ротора

$$C_R = \left(\frac{1}{k_{wR} k_{\varphi R} s_R B_R}\right)^{1/4} = \tau_R \sqrt[4]{\frac{2p\lambda_{1R} \sqrt{2} f_R}{P_R \beta}}. \qquad (33)$$

Из уравнения (3) гл. 1 следует

$$\frac{P}{2pf2\pi} = F_s \Phi,$$

где $F_s$ — м. д. с. статора на полюс

$$F_s = \frac{\pi}{4} F_1 = \frac{\sqrt{2} m}{4p} w k_w I_1.$$

Для ротора

$$\frac{P_R}{2pf_R} = 2\pi F_R \Phi = \frac{P}{2pf} \frac{F_R}{F_s}. \qquad (34)$$

Если $F_R \gg F_s$, то размеры машины будут определяться нагрузкой не статора, а ротора (турбогенератор, быстроходный синхронный компенсатор и т. п.).

Причины, по которым $C_s \to \text{const}$ (или $C_R \to \text{const}$), можно установить в результате анализа основных коэффициентов § 1-6, входящих в $k_\varphi$, и произведения $sB$.

Этот анализ показывает, что величина $k_\varphi \to \text{const}$, так как произведение $\zeta\lambda$ имеет максимум, равный 0,25, $\varphi_{Cu}$ и $\varphi_{Fe}$ имеют максимум из условий технологического использования, а произведение $Bs$ имеет максимум из условия нагрева и экономических соображений (экономические значения удельных нагрузок).

Пользоваться универсальной машинной постоянной для определения размеров машин можно в следующем порядке.

Находим полюсное деление из уравнения (32)

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P\beta}{2p\lambda_1 \sqrt{2} f}} \quad \text{или} \quad \tau = C_R \sqrt[4]{\frac{P\beta}{2p\lambda_1 \sqrt{2} f_1} \frac{F_R}{F_s}}. \qquad (35)$$

При этом можно пользоваться $C_s = C_R = \text{const}$, например 4,0 $см/дж^{1/4}$, или определить ее из формулы, выбирая оптимальные значения коэффициентов, входящих в $k_\varphi$, и величину $sB$ по экономическим соображениям или по нагреву.

Плотность тока по нагреву определяется типом и мощностью машины, напряжением, системой вентиляции и рядом других условий.

Для построенных хорошо использованных в тепловом отношении машин пределы изменения плотности тока незначительны. Крупные и высоковольтные машины имеют плотность тока 2—3 $а/мм^2$, средние 3—4 $а/мм^2$, мелкие и низковольтные 6—7 $а/мм^2$ и выше.

Индукция по нагреву и насыщению определяется так же, как и плотность тока в соответствии с типом, мощностью машины и системой вентиляции. Для построенных и хорошо использованных машин индукция в воздушном зазоре и средняя индукция $B$ в зубцах приведены ниже.

| Машины | $B_\delta$, *гс* | $B$, *гс* |
|---|---|---|
| Крупные (свыше 100 *квт*) | 9000—10 000 | 16 000—20 000 |
| Средние (до 100 *квт*) | 7000— 9 000 | 14 000—18 000 |
| Малые (до 10 *квт*) | 5000— 7 000 | 10 000—14 000 |
| Мелкие (до 1 *квт*) | 2000— 4 000 | 4 000— 8 000 |

Как видно, в нормальных машинах индукция изменяется незначительно (если не считать малых и мелких машин).

Значение индукции в трансформаторах приведено в табл. 32.

## 2-5. ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТА ГЕОМЕТРИИ ПОЛЮСА $\beta = \frac{\tau}{l_i}$

Из условий соразмерности. В наиболее соразмерной модели потери в лобовой части должны быть равны потерям в активной части. Так как сечение меди обычно одинаково, то, следовательно, должно быть

$$l_л \approx l_i.$$

Поскольку длина лобовой части $l_л$ пропорциональна полюсной дуге ($l_л = k_1\tau$), где $k_1$ зависит от типа обмотки (для внешних якорей обычно $k_1 \approx 1{,}6—2$, для внутренних $k_1 \approx 1—1{,}4$), то найдем

$$\beta = \frac{\tau}{l_i} = \frac{1}{k_1}, \qquad (36)$$

т. е.

$$\beta = (0{,}5 — 1{,}0).$$

Из условий предельной окружной скорости. Так как по условиям допустимых механических напряжений в якорях, бандажах во всех машинах имеют место предельные окружные скорости

$$v_{a_{\max}} = \pi D n = 2p\tau n = 2f\tau \text{ см/сек}, \qquad (37)$$

то из выражения (9) гл. 1 получаем

$$Pn = \frac{k_w}{\sqrt{2}} v_a^2 l_i B_{\delta_1} A, \qquad (38)$$

откуда находим

$$\beta_{\max} = \frac{k_w v^2_{a_{\max}} B_{\delta_1} A}{2\sqrt{2} P f n}. \qquad (39)$$

Соответственно, максимальное полюсное деление и диаметр:

$$\tau_{\max} = \frac{v_{a\max}}{2f}; \quad D_{\max} = \frac{2p\tau_{\max}}{\pi}. \qquad (40)$$

Как видно из уравнения (39), при $v_{a_{\max}} = \text{const}$ и $B_{\delta_1} A = \text{const}$ условия соразмерности нарушаются с ростом мощности и скорости вращения.



Из условий минимума потерь и минимума стоимости материалов коэффициент геометрии полюса должен быть в пределах $0{,}4 < \beta < 0{,}8$ (§ 2-8). С учетом быстрого роста вентиляционных потерь с ростом диаметра для крупных машин, согласно [85]

$$\beta = \frac{a}{b + c\frac{P}{2p}}, \qquad (41)$$

где $a$, $b$ и $c$ — постоянные.

Кривые значений $\beta$ приведены на рис. 7.

Выбор $\beta$ из условий желаемых характеристик и параметров ($\cos\varphi$, к. п. д., перегружаемость) показан на примерах расчета машин различных типов и в § 2-8 и 2-9.

На выбор величины $\beta$ в отдельных случаях оказывают влияние задаваемые маховые моменты $GD^2$ (особенно в двигателях для поршневых компрессоров), а также соображения серийности, когда желательно получить две или три машины, отличающиеся только длиной. При этом уменьшение стоимости затрат производства окупает увеличение стоимости от нарушения соразмерности. Имеется и ряд других обстоятельств, которые должны быть приняты во внимание при выборе $\beta$, например, условия нагревания, условия механических напряжений, коммутации в машинах постоянного тока, критических скоростей и т. д. Эти обстоятельства, однако, могут быть учтены в полной мере только в процессе расчета.

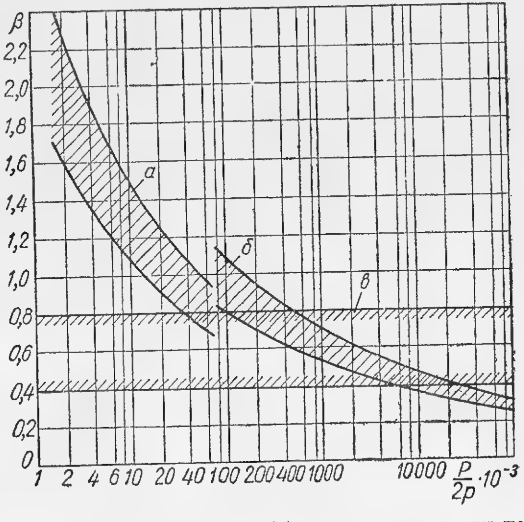



Рис. 7. Зависимость коэффициента геометрии полюса от мощности на полюс:

*а* — для малых машин; *б* — для средних и крупных машин; *в* — по минимальному расходу материалов.

## 2-6. ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТА ГЛУБИНЫ ПАЗА $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$

Этот коэффициент имеет весьма важное значение с эксплуатационно-технической точки зрения. Исследования, проведенные в § 2-8, показывают, что существуют такие коэффициенты $\lambda_1$ и $\beta$, при которых стоимость материалов будет минимальной.

Из этих условий $\lambda_1 \approx 0{,}1 — 0{,}25$.

Из эксплуатационно-технических условий необходима определенная величина относительной реактивности рассеяния $x_s$, с которой $\lambda_1$ связана зависимостью

$$\lambda_1 = k_1' \sqrt{\frac{x_s}{\tau}} \approx k_1'' \frac{\sqrt{x_s}}{\sqrt[6]{\frac{P}{2p}}}.$$

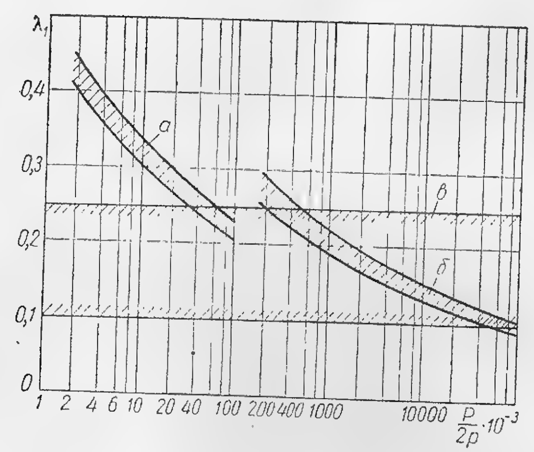



Рис. 8. Зависимость отношения глубины паза к полюсному делению от мощности на полюс:

*а* — для малых машин; *б* — для средних и крупных машин; *в* — по минимальному расходу материалов.

Для крупных и средних машин $k_1' \approx 4 - 5$, $k_1'' = 6 - 7$; для мелких машин $k_1'' \approx 4{,}5 - 5$. Кривые $\lambda_1$ приведены на рис. 8, а практические величины $\lambda_1$ — на рис. 205 и 261.

## 2-7. ВЫБОР РАЗМЕРОВ ЯРМА ИЗ УСЛОВИЙ МИНИМУМА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ

При выборе внешнего диаметра для сокращения габаритов машины стремятся уменьшить высоту ярма. Однако это приводит к росту потерь в ярме. Оптимальное экономическое решение может быть найдено по [85] из условия минимума действительной стоимости.

Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Отношение потерь в зубцах к потерям в ярме равно

$$\frac{p_z}{p_j} = \frac{G_z B_z^2 c_{Fez}}{G_j B_j^2 c_{Fej}} = \frac{M_z \zeta B_z^2 c_{Fez}}{M_j B_j^2 c_{Fej}},$$

где

$B_z$ и $B_j$ — индукции в зубцах и ярме;

$c_{Fez}$ и $c_{Fej}$ — постоянные материала.



Стоимость ярма $Mj$ пропорциональна его весу $M_j \equiv G_j$, а стоимость зубцов с учетом обрезков $M_z \equiv \frac{1}{\zeta} G_z$.

Из отношения потерь получим отношение индукций

$$\frac{B_z}{B_j} = \sqrt{\frac{p_z}{p_j} \frac{M_j c_{Fej}}{\zeta M_z c_{Fez}}}. \quad (42)$$

С другой стороны, поскольку $\Phi = B_z \zeta \tau l_{Fe} = 2 B_j h_j l_{Fe}$,

$$\frac{B_z}{B_j} = \frac{h_j \pi}{\tau \zeta}. \quad (43)$$

Отношение высоты ярма к полюсному делению

$$\frac{h_j}{\tau} = \frac{h_п}{\tau} \frac{M_j}{M_z} = \lambda_1 \frac{M_j}{M_z}. \quad (43a)$$

Приравнивая (42) и (43), получим

$$\frac{M_j}{M_z} \frac{p_j}{p_z} = \frac{c_{Fej} \zeta}{\pi^2 \lambda_1^2 c_{Fez}} = k_1. \quad (44)$$

При выбранной величине $\tau$ и размерах пазов величина $k_1 = \text{const}$.

Следовательно, произведение из стоимости ярма на величину потерь в ярме — величина постоянная. Если, как в § 2-1, ввести стоимость потерь в ярме

$$M_{pj} = p_j m_{p0} T \cdot t_{0г},$$

то получим

$$M_j \cdot M_{pj} = \text{const}.$$

Действительная стоимость

$$M_д = M_j + M_{pj}$$

будет, очевидно, минимальной при

$$M_j = M_{pj},$$

т. е. когда стоимость ярма будет равна стоимости потерь в ярме.

Следовательно, в оптимальном случае

$$\frac{M_j}{M_z} = \frac{p_j}{p_z}.$$

Из уравнения (44) при $c_{Fez} = c_{Fej}$ получаем оптимальные отношения:

$$\left(\frac{p_j}{p_z}\right)_{опт} = \left(\frac{M_j}{M_z}\right)_{опт} = \frac{\sqrt{\zeta}}{\pi \lambda_1}. \quad (45)$$

Так как

$$M_j / M_z = \frac{h_j}{h_п},$$

то оптимальная высота ярма

$$h_j = h_п \frac{\sqrt{\zeta}}{\pi \lambda_1}. \quad (46)$$

В многополюсных машинах $\lambda_1 = 0{,}27 - 0{,}3$ и при $\zeta = 0{,}6$ $h_j \approx (0{,}8 - 1) h_п$; в турбогенераторах $\lambda_1 = 0{,}08 - 0{,}1$, при $\zeta = 0{,}6$ $h_j \approx (3 - 3{,}5) h_п$.

Если в (43) принять $B_j = \zeta B_z$, то получим

$$h_j = \frac{1}{\pi}\tau. \qquad (46а)$$

При этом суммарная высота ярма и высота паза

$$h_j + h_п = \left(\frac{1}{\pi} + \lambda_1\right)\tau \approx (0{,}5 - 0{,}6)\,\tau, \qquad (46б)$$

внешний диаметр

$$D_j = D + 2\,(h_j + h_п) = D + (1{,}0 - 1{,}2)\,\tau. \qquad (46в)$$

При практическом выборе размеров необходимо иметь в виду условия насыщения, нагрева, механические условия (жесткость ярма, вибрации) и технологические условия (раскрой листовой стали, использование существующих штампов и пр.).

При уменьшении размеров ярма магнитный поток из-за насыщения начинает замыкаться помимо ярма также через воздух. Это может привести к потерям в корпусе от вихревых токов, вызываемых этим потоком. Для ослабления этого потока (в случае необходимости) могут быть применены медные демпферные контуры, размещенные на внешней поверхности спинки статора.

## 2-8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ $\beta$ И $\lambda_1$

Выразим веса железа и меди якоря через полюсное деление и исследуемые коэффициенты $\beta$ и $\lambda_1$.

Вес зубцов

$$G_z = 2p\tau\lambda_1\tau\zeta l_i\varphi_{Fe}\gamma_{Fe}, \qquad (47)$$

где

$$\varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i}\,;\ \gamma_{Fe} = 7{,}6 \cdot 10^{-3}\ кг/см^3.$$

$\left(\text{Если включить и вес обрезков, то надо положить } \zeta = \frac{b_z}{t_1} = 1\right)$.

Вес ярма

$$G_j = \pi\,[D \pm (2\lambda_1\tau + \lambda_j\tau)]\,\lambda_1\tau l_i\varphi_{Fe}\,\gamma_{Fe}. \qquad (48)$$

Знак «+» для внешних и знак «—» для внутренних якорей.

Отношение высоты ярма к полюсному делению здесь можно принять постоянной величиной (§ 2-7)

$$\lambda_j = \frac{h_j}{\tau} \approx \frac{1}{\pi}\,.$$

Складывая (47) и (48) и вводя $\beta = \frac{\tau}{l_i}$ и стоимость единицы веса $m_{Fe}$, получим стоимость железа

$$M_{Fe} = 2p\frac{\tau^3}{\beta}\,k_{Fe}\left[\lambda_1 + \frac{\lambda_j}{\zeta} \pm \left(\frac{\pi}{p\zeta}\lambda_1\lambda_j + \frac{\pi}{2p}\,\frac{\lambda_j^2}{\zeta}\right)\right], \qquad (49)$$

где

$$k_{Fe} = \varphi_{Fe}\gamma_{Fe}m_{Fe}\left(1 + b'_{21}\right)\zeta,$$

$b'_{21}$ — коэффициент увеличения стоимости за счет конструктивных деталей якоря и стоимости вторичного якоря, если ее целиком или частью принимать пропор-



циональной стоимости железа первичного якоря.

Аналогично получим стоимость меди

$$M_{Cu} = 2p\,\frac{\tau^3}{\beta}\,k_{Cu}\,[\lambda_1 + k_1\beta\lambda_1], \qquad (50)$$

где

$$k_{Cu} = \varphi_{Cu}\gamma_{Cu}m_{Cu}\left(1 + a'_{21}\right)\lambda;\ \lambda = \frac{b_п}{t_1} \approx 0{,}5;$$

$a'_{21}$ — коэффициент, учитывающий дополнительную стоимость изоляции якоря и стоимость меди с изоляцией вторичного якоря, если ее целиком или частью принимать пропорциональной стоимости меди первичного якоря;

$k_1$ — коэффициент длины лобовых частей (для внешних якорей $k_1 \approx 1{,}6 - 2$; для внутренних якорей $k_1 = 1{,}2 - 1{,}4$).

Согласно (38) гл. 1

$$\tau = \left(\frac{P\beta}{2pf\sqrt{2}\;k_w\lambda_1k_\varphi sB}\right)^{\frac{1}{4}}\,. \qquad (51)$$

Подставляя значение $\tau$ из (51) в (49) — (50), суммируя и деля на мощность $P$, получим суммарную относительную стоимость материалов якоря

$$M = \frac{M_{Fe} + M_{Cu}}{P} = \left(\frac{2p}{P}\right)^{\frac{1}{4}}\left(\frac{1}{f\sqrt{2}\;k_wk_\varphi sB}\right)^{\frac{3}{4}}k_{Fe}\left[\frac{b_1\lambda_1 + c_1 + v\,(\lambda_1 + k_1\beta\lambda_1)}{\beta^{1/4}\lambda_1^{3/4}}\right], \qquad (52)$$

где

$$v = \frac{k_{Cu}}{k_{Fe}} = \frac{\varphi_{Cu}\gamma_{Cu}m_{Cu}\,(1 + a'_{21})\,\lambda}{\varphi_{Fe}\gamma_{Fe}m_{Fe}\,(1 + b'_{21})\,\zeta}\,; \qquad (52а)$$

$$b_1 = 1 \pm \frac{\pi}{p}\,\frac{\lambda_j}{\zeta}\,;\ c_1 = \frac{\lambda_j}{\zeta}\left(1 \pm \frac{\pi}{2p}\,\lambda_j\right). \qquad (52б)$$

Относительная стоимость материалов, при указанных выше предположениях, будет зависеть от сомножителя выражения (52) в квадратных скобках. Те значения $\lambda_1$ и $\beta$, при которых это выражение будет минимальным, и будут «экономическими». (Кавычки означают условность этого понятия.) Если эти значения удовлетворяют и другим требованиям (механические нагрузки, параметры и пр.), то тогда их можно считать близкими к действительным экономическим значениям. Решение задачи на минимум, т. е. системы

$$\frac{\partial M}{\partial \lambda_1} = 0 \ \text{и}\ \frac{\partial M}{\partial \beta} = 0$$

дает

$$\beta = \frac{b_1 + v}{2vk_1} = \frac{v + 1 \pm \frac{1}{p\zeta}}{2vk_1}\,; \qquad (53)$$

$$\lambda_1 = \frac{2c_1}{b_1 + v}\,. \qquad (54)$$

Если принять $\lambda_j \approx \frac{1}{\pi}$, то

$$\lambda_1 = \frac{2}{\pi\zeta}\,\frac{1 \pm \frac{1}{2p}}{v + 1 \pm \frac{1}{p\zeta}}\,. \qquad (54а)$$

При $\varphi_{Cu} \approx 0{,}35$, $\varphi_{Fe} \approx 0{,}75$, $\frac{\gamma_{Cu}}{\gamma_{Fe}} = \frac{8{,}9}{7{,}6}$, $\zeta = 1$, $\frac{m_{Cu}}{m_{Fe}} = 5$, $\lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0{,}5$, $\frac{1 + a'_{21}}{1 + b'_{21}} \approx 1{,}5 - 3$ получим $v = 2 - 4$. Тогда для машин с внешним якорем:

при $p = 1$

$$\beta = \frac{0{,}75 \div 1}{k_1}; \quad \lambda_1 = 0{,}16 \div 0{,}238;$$

при $p = \infty$

$$\beta = \frac{0{,}6 \div 0{,}7}{k_1}; \quad \lambda_1 \approx 0{,}21 \div 0{,}125.$$

Для машин с внутренним якорем: при $p = 2$

$$\beta = \frac{0{,}56 \div 0{,}625}{k_1}$$

(здесь $k_1$ меньше и составляет $1{,}2 \div 1{,}4$) и

$$\lambda_1 = 0{,}1 \div 0{,}19;$$

при $p > 10$

$$\beta = \frac{0{,}7 \div 0{,}6}{k_1}; \quad \lambda_1 = 0{,}12 \div 0{,}2.$$

Как видим, полученные значения $\beta$ и $\lambda_1$ в малой степени зависят от числа полюсов и близки к обычно употребляемым (рис. 261).

Определение $\beta$ и $\lambda_1$ из условий минимума электромагнитных потерь приводит к уравнениям, аналогичным (53) и (54)

$$\frac{\Sigma p'_э}{P} = \frac{p_{Cu} + p_{Fe}}{P} = \left(\frac{2p}{P}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{f\sqrt{2}\,k_w k_ф s B}\right)^{\frac{3}{4}} k''_{Fe} \left[\frac{1 + k_{pj} + v'(1 + k_1\beta)}{\beta_1^{1/4} \cdot \lambda_1^{1/4}}\right], \qquad (55)$$

где

$$k''_{Fe} = B^2 \varphi_{Fe} c_{Fe} \zeta; \quad v' = \frac{s^2 \rho \varphi_{Cu} \lambda}{B^2 c_{Fe} \varphi_{Fe} \zeta}.$$

Если принять $s = 360 - 500$ *а/см²*, $\rho = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *омсм*, $\varphi_{Cu} = 0{,}35$, $\lambda = 0{,}5$, $B = (1{,}7 \div 2) \cdot 10^{-4}$ *вбсм* (17 000 ÷ 20 000 *гс*), $c_{Fe} = p_{10}\gamma_{Fe}10^8 \approx 13{,}6 \cdot 10^5$ (при $p_{10} = 1{,}8$ *вт/кг*), $\varphi_{Fe} = 0{,}75$, $\zeta = 0{,}6$ (здесь нельзя полагать $\zeta = 1$), то получим $v' = 2 \div 4$. Подставляя в формулы (53), (54) вместо $v$ величину $v'$, получим оптимальные значения $\beta$ и $\lambda_1$ из условия минимума потерь. Их значения остаются близкими к вычисленным выше из условия минимума стоимости материалов. Если исходить из минимума полных потерь, в том числе и вентиляционных, то с ростом мощности на полюс величина $\beta$ должна уменьшаться в соответствии с кривой рис. 7.

Необходимость удовлетворения ряду эксплуатационно-технических требований приводит также к тому, что величина $\beta$ согласно рис. 7 уменьшается с ростом числа полюсов и с ростом мощности машины.

Из формулы (51) видно, что при постоянстве $\beta$ с ростом мощности при данном числе полюсов полюсное деление растет, но при этом растет диаметр $D = 2p\tau$. Окружная скорость $v_a = \pi D n$ ограничена допустимыми центробежными силами ротора. Поэтому приходится с ростом мощности уменьшать величину $\beta$. Так, например, в сверхмощных турбо- и гидрогенераторах из условия получения допустимых диаметров и окружных скоростей приходится брать уменьшенные значения $\beta$ (до $\beta = 0{,}25$).

При увеличении числа полюсов при данной мощности $P$ величина $\beta$ обычно также уменьшается (рис. 262), так как с ростом числа полюсов и диаметра окружную скорость приходится уменьшать. С другой стороны, в мелких асинхронных машинах из условия получения достаточно высокого $\cos\varphi$ приходится увеличивать $\beta$ до 1,5 — 2,0.

Практическое значение $\lambda_1$ обычно определяется условиями получения заданных параметров (реактивного сопротивления рассеяния в синхронных и асинхронных машинах, реактивной э. д. с. в коммутируемой секции машин постоянного тока), а также условиями отвода тепла от обмотки якоря. Обычно для тихоходных машин переменного тока $\lambda_1$ лежит в пределах 0,3—0,2, а для быстроходных машин и машин постоянного тока — в пределах 0,1 — 0,15; при этом бóльшие значения относятся к меньшим $\tau$.



## 2-9. ВЛИЯНИЕ НА РАЗМЕРЫ МАШИНЫ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТРЕБОВАНИЙ

### Влияние заданных параметров

Согласно § 4-6 все относительные реактивные сопротивления могут быть представлены в виде

$$x = k_\lambda \frac{A}{B_\delta} \qquad (56)$$

(в машинах) и

$$x = k'_\lambda \frac{A}{B}$$

(в трансформаторах), где $k_\lambda$ и $k'_\lambda$ — постоянные.

Так как индукция в воздухе или в сердечнике трансформатора часто выбирается по допустимому насыщению железа, как предельная величина, мы можем приближенно считать ее неизменной и, следовательно, относительную реактивность полагать пропорциональной линейной нагрузке. Уменьшение $x$ приводит к уменьшению $A$, а значит к увеличению веса на единицу мощности и к удорожанию машины, так как согласно § 1-4 вес машины заданной скорости на 1 *ква* пропорционален

$$\frac{G}{P} \equiv \frac{1}{AB_\delta}. \qquad (57)$$

Требование определенной величины относительного активного сопротивления

$$r = \frac{r_{(ом)} I_N}{U_N} = \frac{m r_{(ом)} I_N^2}{m U_N I_N} \qquad (58)$$

по существу означает требование определенных относительных потерь в меди и зависит от условий нагрева и экономических условий, т. е. от соотношения стоимости потерь и стоимости материалов.

Таким образом, всякое уменьшение относительной реактивности, например с целью повышения устойчивости параллельной работы (о. к. з.) или с целью уменьшения внутреннего падения напряжения, вызывает удорожание машины. Оптимальные величины реактивностей зависят от условий работы машины. Повышение $\cos\varphi$ в асинхронных машинах связано с уменьшением реактивностей рассеяния и увеличением реактивности взаимоиндукции. Так как уменьшение реактивностей рассеяния имеет предел (например с точки зрения пусковых токов), увеличение $\cos\varphi$ в асинхронных машинах требует увеличения $x_m$, равного

$$x_m = \frac{\sqrt{2}\,k_w A \tau}{\pi B_{\delta,} \delta'}. \qquad (59)$$

Однако, как известно,

$$\cos\varphi_{max} = \frac{I_{ki} - I_\mu}{I_{ki} + I_\mu} = \frac{1 - \frac{x_к}{x_m}}{1 + \frac{x_к}{x_m}}, \qquad (60)$$

а так как $x_к = k_\lambda \frac{A}{B_{\delta_1}}$, то увеличить $\cos\varphi$ асинхронной ненасыщенной машины путем изменения соотношения $\frac{A}{B}$ невозможно. Остается, следовательно, путь уменьшения $\frac{x_к}{x_m}$ за счет геометрических соотношений $\frac{\tau}{\delta}$, $\beta$, $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$ и т. д.

Из условий максимума $\cos\varphi$ необходимо выбирать:

$$\lambda_1 = \lambda_{1\,min};$$
$$\delta = \delta_{min};$$
$$\beta = \beta_{max} = \frac{k}{\tau} = k'\left(\frac{2p}{P}\right)^{1/6}, \qquad (61)$$

где $k \cong 18 - 20$; $k' \cong 4 - 5$*.

В синхронной машине величина $\cos\varphi$ при заданном о. к. з. (или $x_d = \frac{1}{о.к.з.}$) определяется величиной м. д. с. возбуждения. Здесь $\cos\varphi_{max} = 1$ получается при вполне определенной величине возбуждения. Из векторной диаграммы неявнополюсной машины следует:

$$\sin\varphi = \frac{E_f^2 - U^2 - (Ix_d)^2}{2UIx_d}.$$

При

$$U = 1;\ E_f = k_f U;\ I = I_N = 1$$

$$\sin\varphi = \frac{k_f^2 - 1 - x_d^2}{2x_d}, \qquad (62)$$

т. е. $\cos\varphi_{max} = 1$ получится при $k_f = \sqrt{1 + x_d^2}$.

Перевозбуждение (увеличение $k_f$) приводит к уменьшению $\cos\varphi$ и почти пропорциональному возрастанию цены машины. Недовозбуждение (уменьшение $k_f$) приводит также к уменьшению $\cos\varphi$ и, соответственно, к удешевлению машины за счет уменьшения потерь в меди ротора и ее стоимости, определяемой величиной м. д. с. возбуждения.

В трансформаторах

$$x_к = k'_\lambda \frac{A}{B_s} \qquad (63)$$

и, следовательно, уменьшение относительной величины $x_к$ [согласно (57)] также приводит к возрастанию веса и цены трансформатора.

### Влияние к. п. д. и распределэния потерь

Из уравнения (24) получаем

$$\tau = \frac{1}{f\sqrt{2}k_w}\sqrt{\frac{c_{Fe}\rho\xi}{k_\varphi}\frac{P}{p_{Cu\,п}}} = \frac{1}{f\sqrt{2}k_w}\sqrt{\frac{c_{Fe}\rho}{k_\varphi}\frac{1}{\xi}\frac{P}{p_{Fe\,z}}}, \qquad (64)$$

* Для мелких машин $k'$ может быть значительно выше.



где $c_{Fe} = p'_{10}\gamma_{Fe}10^8$ *вт/см*$^3$ (*вб/см*$^2$)$^2$ — постоянная потерь в железе;
$\gamma_{Fe}$ — удельный вес железа ($7{,}6 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*$^3$);
$p'_{10}$ — удельные потери в *вт/кг* при $B = 1$ *вб/м*$^2$ (10 000 *гс*).

Формулу (64) можно представить также в виде

$$\tau = \frac{1}{f\sqrt{2}k_w}\sqrt{\frac{c_{Fe}\rho\xi}{k_\varphi}\frac{P}{\Sigma p}\frac{\Sigma p}{p_{Cu\,п}}} =$$
$$= \frac{1}{f\sqrt{2}k_w}\sqrt{\frac{c_{Fe}\rho\xi}{k_\varphi}\frac{\eta}{1-\eta}\frac{1}{\cos\varphi}\frac{\Sigma p}{p_{Cu\,п}}}. \qquad (65)$$

Диаметр якоря $D = \frac{2p\tau}{\pi}$.

Из формул (64) и (65) видно влияние на размеры машины:
а) коэффициентов, входящих в $k_\varphi$;
б) сорта стали (величина $c_{Fe}$);
в) отношения потерь $\xi = \frac{p_{Cu\,п}}{p_{Fe\,z}}$;
г) частоты (необходимо только иметь в виду, что $c_{Fe}$ есть также функция частоты).

Если принять для $k_\varphi$ величину 0,075, для $k_w$ — величину 0,95, постоянную потерь $c_{Fe}$ при $p'_{10} = 2{,}4$ *вт/кг* и $\gamma = 7{,}6 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*$^3$ принять равной $2{,}4 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^8 = 18{,}7 \cdot 10^5$, а удельное сопротивление принять $\rho = 2{,}4 \cdot 10^{-6}$ *омсм* (с учетом температуры $\theta° = 75°C$ и дополнительных потерь), то при этих условиях из (65) получим

$$\tau = 0{,}142\frac{\eta}{1-\eta}\frac{\sqrt{\xi}}{\cos\varphi}\frac{\Sigma p}{p_{Cu\,п}}\ см. \qquad (66)$$

Пусть, например, мы желаем определить полюсное деление и диаметр гидрогенератора 30 *Мва* ($n = 150$ об/мин, $2p = 40$) при $\eta = 0{,}965$ и $\cos\varphi = 0{,}8$.

Суммарные потери

$$\sum p = P_2\frac{1-\eta}{\eta} = 30 \cdot 10^6 \cdot 0{,}8\frac{0{,}035}{0{,}965} = 870 \cdot 10^3\ вт.$$

Механические потери (на трение и вентиляцию), добавочные потери и потери на возбуждение оцениваем по данным опыта в 2% от $P_2$, т. е. $0{,}02 \cdot 24 \cdot 10^6 = 480 \cdot 10^3$ *вт*.

Распределяя оставшиеся электрические потери в якоре 390 *квт* согласно принципу соразмерности поровну между железом и медью, получим $p_{Cu} = 195$ *квт*.

Распределяя далее потери в меди $p_{Cu}$ поровну между пазовой и лобовой частью, получим потери в пазовой части

$$p_{Cu\,п} = \frac{195}{2} = 97{,}5\ квт \quad и \quad \frac{\Sigma p}{p_{Cu\,п}} = \frac{870}{97{,}5} \approx 9{,}0$$

и по формуле (66) найдем полюсное деление при $\xi = 1$ и диаметр

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{40 \cdot 44{,}5}{\pi} \approx 570\ см.$$

Длина машины определится выбранной величиной $\beta = \frac{\tau}{l}$. Для данной машины оптимальное значение $\beta \approx 0{,}5$ (рис. 7), т. е.

$$l = \frac{\tau}{\beta} = \frac{44{,}5}{0{,}5} = 89 \text{ см}.$$

Полученные значения диаметра и длины необходимо проверить по формуле $C_A = \frac{D^2 ln}{P}$, если значение $C_A$ известно, например, по данным близких по типу и мощности машин или выбрано по уравнению (40) гл. 1.

Можно применить формулу (65) и для неявнополюсной машины, например турбогенератора. Пусть мы имеем турбогенератор 30 *Мва*, $n = 3000$ об/мин ($2p = 2$). При $\eta = 0{,}97$ и $\cos\varphi = 0{,}8$ получаем

$$\sum p = 24 \cdot 10^6 \frac{0{,}03}{0{,}97} = 740 \cdot 10^3 \text{ вт}.$$

Механические и добавочные потери по данным опыта оцениваем в 2% от $P_2$, т. е. 480 *квт*. Оставшиеся электрические потери 260 *квт* разделяем на три части: в меди статора 70 *квт*, в меди ротора 90 *квт*, в железе статора 100 *квт*. Распределяя потери в железе статора между зубцами $p_z$ и ярмом $p_j$ по § 2-7 как 1 : 3, получим $p_z = 25$ *квт*, $p_j = 75$ *квт*. Потери в меди статора распределяем поровну между пазовой и лобовой частью; при этом получаем

$$\frac{\Sigma p}{p_{\text{Cu п}}} = \frac{740}{35} = 21; \quad \xi = \frac{35}{25} = 1{,}4.$$

Полюсное деление по (66)

$$\tau = 0{,}142 \frac{0{,}97}{0{,}3} \frac{\sqrt{1{,}4}}{0{,}8} 21 = 142 \text{ см}$$

и диаметр

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{2 \cdot 142}{\pi} \approx 90 \text{ см}.$$

Расчет основных размеров по методу потерь для трансформаторов произведен в гл. 9. Для трансформаторов этот метод оказывается весьма удобным, так как требует знания только отношения $\xi = \frac{p_{\text{Cu}}}{p_{\text{Fe}}}$. Для электрических машин применение этого метода на практике связано с затруднениями, так как требует предварительного определения механических потерь (на трение и вентиляцию) и распределения электрических потерь, которое не всегда очевидно. Тем не менее, этот метод является весьма полезным и при расчете машин.

Для приведения уравнения (65) к виду, применяемому для трансформаторов, вводим к. п. д. якоря без механических потерь, добавочных потерь и потерь вторичного якоря. Тогда из (65) получаем

$$\tau = \frac{K_1}{f} \frac{\eta_э (1 + \xi)}{(1 - \eta_э)\sqrt{\xi}} = \frac{K_1}{f} \frac{1}{p'_э} \frac{1 + \xi}{\sqrt{\xi}}, \quad (67)$$



где

$$K_1 = \sqrt{\frac{c_{\text{Fe}}\rho}{2k_w^2 k_\varphi}} \left[1 + \left(\frac{p_j + p_л}{p_z(1 + (\xi)}\right)\right];$$

$$p'_э = \frac{p'_э}{P} = \frac{\text{электромагнитные потери якоря}}{\text{полная мощность}}. \quad (68)$$

Постоянная $K_1$ для явнополюсных машин находится в пределах 14,5—15, а для неявнополюсных — в пределах 19—20.

Учитывая, что величина $\frac{1 + \xi}{\sqrt{\xi}}$ обычно мало отличается от ее значения при $\xi = 1$, т. е. от 2, получим для явнополюсных машин

$$\tau \approx \frac{30}{f \cdot p'_э} \text{ см} \quad (69)$$

и для неявно полюсных

$$\tau \approx \frac{40}{f \cdot p'_э} \text{ см}. \quad (70)$$

Для рассмотренных выше гидрогенератора и турбогенератора

$$p'_э = \frac{390}{30\,000} = 0{,}013, \quad p'_э = \frac{260 - 90}{30\,000} = 0{,}0057$$

и соответственно

$$\tau = \frac{30}{50 \cdot 0{,}013} \approx 46 \text{ см}, \quad \tau \approx \frac{40}{50 \cdot 0{,}0057} \approx 140 \text{ см}.$$

### Влияние напряжения

Из выражения (32) для универсальной постоянной можно видеть, что при прочих равных условиях увеличение коэффициента заполнения $k_\varphi$ приводит к уменьшению размеров машины. Поскольку все составляющие этого коэффициента, за исключением $\varphi_{\text{Cu}}$, изменяются незначительно, можно считать, что определяющей величиной является коэффициент заполнения паза медью $\varphi_{\text{Cu}}$. При повышении напряжения толщина пазовой изоляции увеличивается и $\varphi_{\text{Cu}}$ уменьшается. Это приводит к удорожанию машины, так как размеры машины и стоимость материалов увеличиваются не только из-за уменьшения $\varphi_{\text{Cu}}$, но и вследствие снижения плотности тока, поскольку условия охлаждения машины ухудшаются; стоимость изоляции увеличивается. При понижении напряжения машины на заданную мощность возрастает величина тока, что приводит к удорожанию подводящей линии и аппаратуры. Кроме того, при понижении напряжения увеличивается число параллельных ветвей, что приводит к увеличению расхода изоляции и меди. Поэтому для каждого типа машины, рода изоляции и ее стоимости существует оптимальное напряжение, при котором общие расходы производства и эксплуатации будут минимальны. Установление этой величины представляет сложную технико-экономическую задачу.

## 2-10. НЕКОТОРЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕРИЙ

Приведенный метод выбора оптимальных размеров машин и трансформаторов дает возможность общей оценки только некоторых наиболее важных условий экономики и эксплуатации. В практике заводского проектирования новых машин индивидуального и серийного производства учитываются многие дополнительные условия (технология, использование готовых штампов и приспособлений, серийность, особые требования заказчика, специфические условия производства различных типов машин и пр.). Определение экономических удельных нагрузок требует знания соотношения между стоимостью потерь и стоимостью материалов. Соотношение этих стоимостей, т. е. эквивалент $k$, не является постоянным для различных типов машин, и его определение является предметом дальнейших исследований в условиях социалистической экономики.

Сложность экономических расчетов состоит в том, что понятие стоимости материалов и потерь в данном случае определяется не только установленными ценами, но также плановыми соображениями, темпом роста отдельных отраслей промышленности, дефицитностью материалов и пр. Приведем несколько примеров. В турбогенераторах с форсированным внутренним охлаждением расход материалов на 1 *квт* получается значительно меньшим, чем при обычной системе вентиляции, но при этом уменьшается к. п. д. Эта экономия за счет к. п. д. турбоагрегата, рассматриваемого отдельно, является невыгодной, и можно было бы сделать преждевременные выводы о нецелесообразности форсированного охлаждения. Однако если учесть, что с ростом мощности в одной машине общий к. п. д. турбогенератора увеличивается, и стоимость сооружений станции уменьшается, то в результате получается большой народнохозяйственный эффект. В ряде машин экономия материалов, связанная с уменьшением веса, получается за счет понижения к. п. д. Но если при этом обеспечиваются более высокие эксплуатационные качества, связанные с повышением производительности труда, то это понижение к. п. д. может быть оправданным. Эффективность экономии материалов для различных машин различна. Это зависит от потребного количества этих машин, дефицитности отдельных видов материалов и пр. Ущерб от уменьшения к. п. д. также различен для различных типов машин, в зависимости от того, как велика общая их мощность, где они устанавливаются, какова продолжительность их работы в течение года, какова их норма амортизации и пр.

Из сказанного следует вывод, что вопрос об экономических нагрузках следует решать конкретно и с учетом всего комплекса основных экономических связей. Применение универсальных экономических формул может привести к совершенно ошибочным выводам, так как эти формулы не учитывают конкретных условий данной экономической задачи.



Наиболее благодарной задачей является изыскание резервов экономии в процессе производства за счет новых конструкций, новых материалов и новой технологии, а также за счет повышения эксплуатационных качеств машины.

Исследование экономических соотношений «внутренней и внешней геометрии»* при проектировании остается тем не менее важной задачей. Например, исследование влияния коэффициентов заполнения в связи с употреблением алюминиевых обмоток с анодированной пленкой вместо изоляции, исследование влияния отношений $\beta = \frac{\tau}{l}$, $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$ и др. на стоимость и эксплуатационные качества, исследование влияния задаваемых параметров на стоимость машины и пр. могут дать существенный экономический эффект.

Закономерности «экономической геометрии» имеют особенное значение при проектировании с е р и й машин и трансформаторов.

С е р и е й называется ряд машин или трансформаторов возрастающей мощности при однотипной конструкции. В главах 9, 10, 11 и 12 приведены данные основных серий трансформаторов и электрических машин.

Серия машин характеризуется:

1) коэффициентом нарастания мощностей, или шкалой мощностей;
2) шкалой скоростей вращения;
3) шкалой внешних диаметров якоря, или габаритов;
4) числом длин в одном габарите;
5) однотипностью конструктивных деталей, системы охлаждения и пр. На каждый диаметр исполняется 2—4 длины. Каждому габариту, каждой длине и каждой скорости вращения соответствует определенная мощность по шкале мощностей. При твердой шкале мощностей отношение мощностей двух следующих друг за другом машин, или коэффициент нарастания мощностей, принимается

$$k_P = \sqrt[10]{10} \approx 1,25.$$

В качестве примера в табл. 3 приводим шкалу мощностей и скоростей вращения единой серии синхронных двигателей (границы серии обведены замкнутой линией) [103]. Шкала скоростей вращения для машин переменного тока имеет приблизительно такой же коэффициент нарастания, как и для мощностей. Коэффициент нарастания шкалы габаритов, или внешних диаметров якоря, и отношение длин в одном габарите также близко к коэффициенту нарастания мощностей. При этом принимается во внимание раскрой стандартной листовой стали при минимуме отходов. Выбор диаметров дан в главах, посвященных расчетам отдельных типов машин. Нормальные диаметры даны в приложении.

Согласно [103], если мы имеем для данного габарита $s$ длин (например при $s = 3$, 1-я длина, 2-я длина и 3-я длина), то отношение длин одного и того же номера для смежных габаритов равно

* Об этих понятиях подробнее см. ниже.

коэффициенту нарастания диаметров габаритов. Очевидно, что только одна из длин (средняя) является оптимальной для данного габарита. Увеличение числа длин выше 3—4 приводит к перерасходу материалов.

*Таблица 3*

**Шкала мощностей и скоростей вращения отрезка единой серии синхронных двигателей**

| Шкала мощностей (в *квт*) | Шкала скоростей вращения (в об/мин) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1000 | 750 | 600 | 500 | 375 | 300 | 250 | 214 | 187 | 176 | 150 | 125 | 100 |
| 250 | | | | | | | | | | | | | |
| 320 | | | | | | | | | | | | | |
| 400 | | | | | | | | | | | | | |
| 500 | | | | | | | | | | | | | |
| 630 | | | | | | | | | | | | | |
| 800 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 000 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 200 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 600 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 000 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 500 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 200 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 000 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 000 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 300 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 000 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 000 | | | | | | | | | | | | | |

При проектировании серий приходится принимать в соображение условия внешней и внутренней геометрии машин. Внешняя геометрия — это основные размеры: диаметр, длина, полюсное деление, конструкция корпуса, щитов и других деталей. Внутренняя геометрия — это размеры пазов и зубцов, число пазов на полюс и



фазу, коэффициенты заполнения и т. п. Внутренняя геометрия определяет параметры машины и потери.

Выбор шкалы напряжений в серии определяется технико-экономическими соображениями. Стандартные напряжения:

низковольтных машин

а) генераторов — 6, 12, 36, 133/230, 230/400, 550;

б) двигателей — 6, 12, 36, 127/220, 220/380, 500, 380/660;

высоковольтных машин (обычно свыше 100 *квт*)

а) генераторов — 1550, 3150, 6300, 10 500, 13 800;

б) двигателей — 1500, 3000, 6000, 10 000.

В серийных машинах при переходе машины данного габарита и данной длины на повышенное напряжение ее мощность снижается на одну ступень по шкале мощностей.

Основные экономические выгоды серийного производства состоят в следующем:

1) удешевляется производство машин ввиду однотипности деталей и технологических процессов;

2) уменьшается расход материалов и труда на единицу продукции;

3) повышается качество машин;

4) упрощается эксплуатация, проектирование и монтаж электроприводов и электроснабжения предприятий в связи с введением стандартизации и унификации типов машин и их деталей.

Число серий машин весьма значительно, так как, кроме серий нормальных машин, имеются модификации, а также специализированные серии машин (взрывобезопасные, крановые, тяговые, металлургические и пр.).

Проектирование серий машин основывается на опыте использования предыдущих серий или отдельных машин. Учитываются технические требования, достижения в отношении технологии, новых изоляционных, магнитных и конструктивных материалов. Принимаются во внимание исследования в области вентиляции и нагрева машин, а также в области динамических режимов электропривода.

Проектирование серий при повышенных экономических показателях (вес активных и конструктивных материалов на единицу мощности, к. п. д., $\cos\varphi$, упрощение технологии, повышение надежности в эксплуатации) представляет собой весьма сложную проблему, требующую большого количества расчетных вариантов и учета многочисленных условий.

В настоящее время при расчете серий применяются счетно-решающие устройства, позволяющие не только быстро осуществить расчет большого количества вариантов, но и выбрать оптимальный вариант.

Приблизительная схема при проектировании серий машин переменного тока может быть следующая:

1) выбираем шкалу мощностей и скоростей вращения;

2) устанавливаем задания в отношении технических требований к новой серии;

3) устанавливаем конструктивный тип, сортамент материалов (изоляционных, проводниковых и магнитных) и пр.;

4) определяем по формулам гл. 2 диаметры и длины для всех машин так, как будто бы каждая машина индивидуальная;

5) выбираем шкалу диаметров из условий раскроя и объединяем ряд машин в один габарит, изменяя длины таким образом, чтобы получилась соответствующая мощность по шкале мощностей. Полученные длины не должны выходить за пределы по нагреву и механическим условиям. Число длин на одном диаметре должно быть не выше 2—4;

6) производим полные расчеты машин для средних длин и устанавливаем возможность сокращения числа типоразмеров, штампов и пр.;

7) проверяем основные показатели оптимальных машин: расход материалов, к. п. д., $\cos\varphi$, нагрев, механические напряжения, параметры, пусковые характеристики, и в случае необходимости изменения отдельных размеров производим новый перерасчет;

8) при удовлетворении поставленных требований по всем показателям производятся подробные расчеты, технологические разработки и рабочее проектирование.

## 2-11. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

При современном высоком уровне развития в электромашиностроении дальнейшие усовершенствования в большинстве случаев покупаются все более дорогой ценой и имеют относительно невысокий процент. Абсолютный эффект растет, однако, быстрее в связи с бурным ростом объема производства и мощностей отдельных машин. При таких условиях увеличение к. п. д. на долю процента или снижение веса на 5—10% представляет собой крупный народнохозяйственный эффект. Как сказано выше, экономическая эффективность машины должна рассматриваться в трех стадиях: 1) в проектировании, 2) в производстве и 3) в эксплуатации. Наиболее существенной является стадия проектирования, в которой должны быть в определенной мере учтены перспективы экономии и в двух других стадиях. Здесь решаются вопросы новых прогрессивных конструкций, новых материалов, новых способов охлаждения и пр. Успехи в этом отношении зависят от развития физики, химии, металлургии, математических наук и т. п., а также от степени использования успехов этих наук в промышленности.

Экономические достижения в производстве связаны не только с технологией, но и с организацией производства, кооперацией и специализацией предприятий, развитием механизации и автоматизации производственных процессов.

Экономика эксплуатации зависит от того, насколько качества машин отвечают требованиям современного электропривода. Машины должны быть построены так, чтобы была возможность повышения производительности труда (регулирование, динамические свойства, высокая надежность). Не следует думать, что в настоящее время в электромашиностроении возможны только мелкие улучшения. Это может быть правильно только в том смысле, что современные серийные машины весьма хорошо использованы. Но это окажется неверным, если учесть перспективы развития отдельных типов машин и возможности создания принципиально новых типов.

Благодаря развитию физики, химии и металлургии в электромашиностроении становятся возможными крупные успехи не только в абсолютном, но и в относительном смысле. Наиболее прогрессивной областью следует признать область новых материалов: кремний-органические лаки, термореактивные компаунды, пленки, стеклоэскапон, слюдинит и другие изоляционные материалы. Особенно перспективной представляется тонкопленочная изоляция, в частности анодированная пленка алюминия.

Столь же крупный эффект получается от применения новых магнитных материалов. Например, применение холоднокатаной стали позволяет получить не только снижение стоимости машин на 25—30%, но и снижение стоимости их эксплуатации в связи с уменьшением потерь в стали. Применение новых проводниковых материалов, например, алюминия с тонкослойной изоляцией и новых конструктивных материалов дает возможность понизить стоимость машин в 2—3 раза.

Крупные успехи достигаются с применением форсированного охлаждения электрических машин (водяное, внутренне-водяное и водородное охлаждение). Это дает возможность повысить мощность турбогенератора в одной машине до 750 000 *квт* и выше. При этом расход материала на единицу мощности сокращается приблизительно в три раза.

Невиданные возможности открываются в связи с использованием атомной энергии в мирных целях (в частности получение генераторов электрической энергии с непосредственным превращением атомной энергии в электрическую и получение мощных атомных конденсаторов-аккумуляторов как источников питания электродвигателей).

В производстве отдельных видов машин имеются далеко не исчерпанные возможности получения крупных экономических результатов:

а) производство микромашин по стоимости годового выпуска значительно превосходит выпуск турбо- и гидрогенераторов. Снижение стоимости микромашин на 50% дает годовую экономию в несколько сот миллионов рублей. Усовершенствование этих машин и развитие объема их производства дает крупный народнохозяйственный эффект, так как эти машины позволяют расширить автоматизацию производства, поднять производительность труда, электрифицировать быт и поднять общий уровень культуры народа;

б) производство сверхмощных турбо- и гидрогенераторов позволяет понизить стоимость машин и электростанций и в результате увеличить энерговооруженность страны. В ко-

нечном счете это обеспечивает заданный народнохозяйственным планом темп развития промышленности и сельского хозяйства;

в) производство массовых усовершенствованных и специализированных серий машин, трансформаторов и автотрансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой обеспечивает успехи энергоснабжения предприятий. Особенно перспективным является развитие производства многоскоростных автоматически регулируемых машин, сухих трансформаторов с теплостойкой синтетической изоляцией, новых серий синхронных двигателей и пр.;

г) производство новых машин и комплектного электрооборудования (для электрической тяги, для воздушного и морского флота и пр.) позволит получить крупную экономию вследствие увеличения к. п. д. машин и уменьшения расходов горючего и обеспечить развитие транспорта соответственно с развитием народного хозяйства.

Указанный выше перечень основных направлений технического прогресса в электромашиностроении является далеко не полным. Кроме того, в процессе бурного технического развития и развития конструкторской мысли многие наши сегодняшние представления о прогрессе завтра могут оказаться безнадежно устаревшими.

---

*Глава третья*

# РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

## 3-1. ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА

Расчет магнитной цепи основан на законе полного тока

$$\int H_l\,dl = \sum i = iw. \tag{1}$$

Левая часть равенства может быть названа падением магнитного напряжения по контуру, а правая часть — магнитодвижущей силой (м. д. с., ампер-витки) по аналогии с законом электрической цепи

$$\int E_l dl = e,$$

где правая часть называется электродвижущей силой (э. д. с.), а левая — падением электрического потенциала по контуру.

Для расчета магнитной цепи обыкновенно удается разбить контур интегрирования на участки, в которых напряженность $H$ может быть принята постоянной, и вместо уравнения (1) написать

$$\sum H_k l_k = iw,$$

где $k$ — номер участка.

На рис. 9 для примера показаны контуры магнитной цепи явнополюсной синхронной машины и неявнополюсной асинхронной машины.

Расчет производится следующим образом. Задаемся каким-либо значением максимума основной волны индукции в воздушном зазоре $B_{\delta 1}$ или максимума действительной индукции $B_\delta$ (рис. 10).

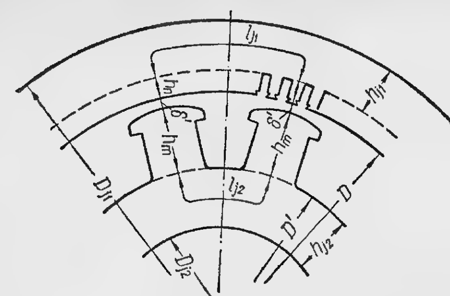
Так как форма кривой поля обычно довольно близка к синусоидальной, то поток основной волны будет приблизительно равен действительному потоку (в особенности для машин переменного тока), т. е.

$$\Phi \approx \Phi_1 = \frac{2}{\pi}\,\tau l_i B_{\delta 1}, \tag{2}$$

где $\tau$ — полюсное деление, $l_i$ — расчетная длина машины, определенная ниже.

Действительный магнитный поток согласно рис. 11 равен

$$\Phi = b_i l_i B_\delta = \alpha_i \tau l_i B_\delta, \qquad (3)$$




где $b_i = \alpha_i \tau$ — расчетная ширина полюсного наконечника. При кривой поля, близкой к синусоидальной,

$$\Phi = \Phi_1$$

и

$$b_i \approx \frac{2}{\pi}\tau; \quad \alpha_i \approx \frac{2}{\pi}. \qquad (4)$$

В общем случае из (2) и (3) получаем

$$\Phi = k_\Phi \Phi_1,$$

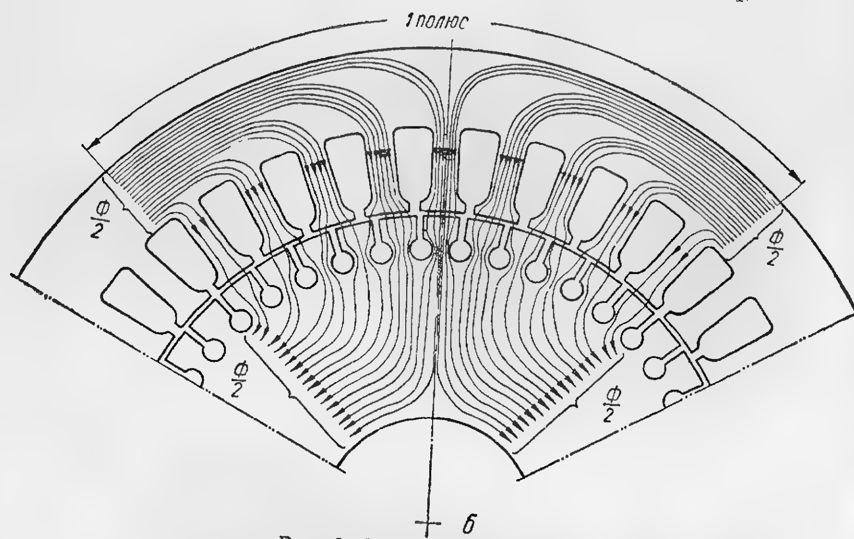



Рис. 9. Магнитная цепь:
*а* — внешнеякорной (внутриполюсной) синхронной машины; *б* — неявнополюсной асинхронной машины.

где

$$k_\Phi = \frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{\pi \alpha_i}{2k_1} \text{ (рис. 12)}, \quad k_1 = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta} \text{ (рис. 13)}.$$

На рис. 12 приведен также коэффициент формы кривой $f_B$. Ниже будет показан метод определения $b_i$ и $\alpha_i$.

Определив, таким образом, величину потока, получим индукции во всех частях машины (см. примеры расчетов):

а) в зубцах

$$B_{zi} = \frac{\Phi}{S_z}, \qquad (5)$$

в предположении, что магнитный поток проходит только через площадь зубцов;



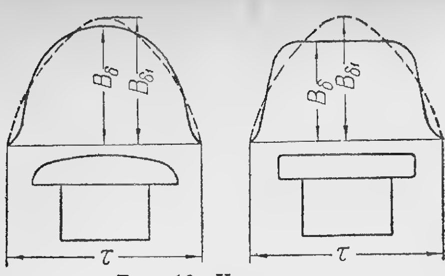



Рис. 10. Кривые поля.

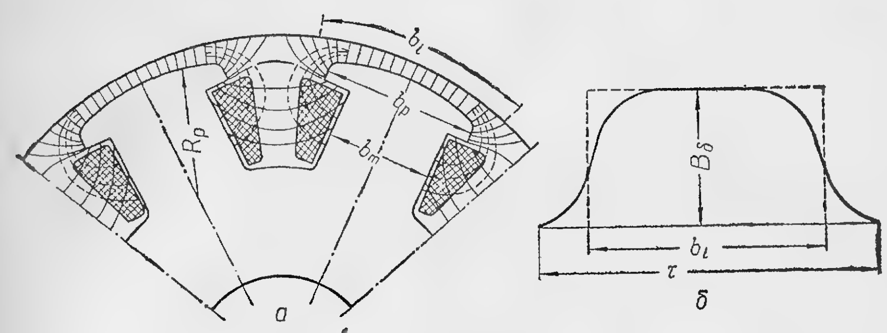



Рис. 11. Магнитное поле в воздушном зазоре синхронной машины:
*а* — картина поля; *б* — кривая поля и определение $b_i$.

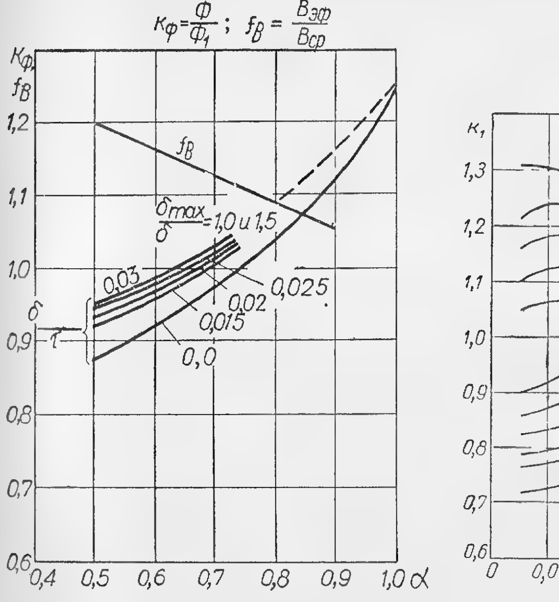



Рис. 12. Изменение коэффициентов потока и формы.

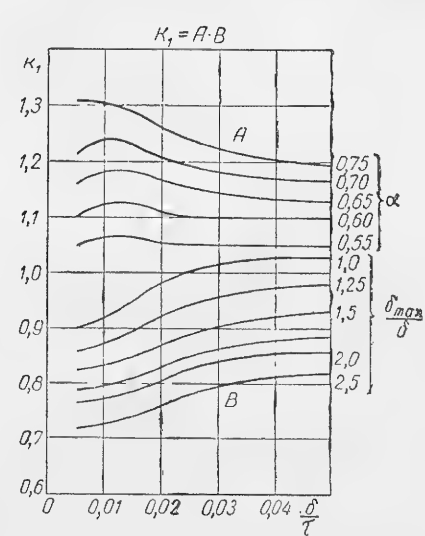



Рис. 13. Определение коэффициента $k_1$ для синхронных явнополюсных машин.

б) в ярме якоря

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2S_{j1}}; \tag{6}$$

в) в сердечнике полюсов

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_{s2}}{S_m} = \frac{\Phi\left(1 + \frac{\Phi_{s2}}{\Phi}\right)}{S_m} = \frac{\Phi_\sigma}{S_m}, \tag{7}$$

где $\frac{\Phi_{s2}}{\Phi}$ — отношение потока рассеяния к потоку взаимоиндукции, которое называется коэффициентом рассеяния потока[1] и в нормальных машинах имеет значение 0,1 — 0,25. Точный расчет этого коэффициента произведен § 12-21;

г) в ярме вторичного якоря (индуктора)

$$B_{j2} = \frac{\Phi_\sigma}{2S_{j2}}. \tag{8}$$

По найденным индукциям находим напряженности поля, пользуясь кривыми намагничивания для данного сорта материала, т. е. зависимостью

$$B = f(H).$$

Кривые $B = f(H)$ приведены для различных материалов в приложении II.

Таким образом, зная длины участков $l_\delta = 2\delta'$, $l_{z1} = 2h_П$, $l_{j1}$, $l_m = 2h_m$, $l_{j2}$ (см. рис. 9), получаем суммарную м. д. с. на пару полюсов, необходимую для проведения заданного потока Ф по рассматриваемой цепи

$$\text{м. д. с.} = 2i_f w = \sum_k H_k l_k = H_\delta l_\delta + H_z l_z + H_{j1} l_{j1} + H_m l_m + H_{j2} l_{j2}. \tag{9}$$

В дальнейшем величину м. д. с. на полюс, равную $iw$, будем обозначать буквою $F$.

Задаваясь рядом значений э. д. с. и соответствующих им потоков $\Phi_1$ для машин переменного тока

$$E = \pi \sqrt{2}\Phi_1 f w_1',$$

$$\Phi_1 = \frac{E}{\pi \sqrt{2} f w'},$$

где $w' = w \cdot k_w$ (§ 4-5), а для машин постоянного тока

$$E = pn\frac{N}{a}\Phi,$$

$$\Phi = \frac{Ea}{pnN},$$

[1] Необходимо различать коэффициенты рассеяния потока $\sigma_{1Ф} = \frac{\Phi_{s1}}{\Phi}$ и $\sigma_{2Ф} = \frac{\Phi_{s2}}{\Phi}$, коэффициенты рассеяния потокосцепления $\sigma_1 = \frac{x_{s1}}{x_m}$, $\sigma_2 = \frac{x_{s2}}{x_m}$ и, соответственно, коэффициенты полного потока $\sigma = 1 + \sigma_Ф$ и полного потокосцепления.



определяем для каждого значения $E$ и Ф величину м. д. с. Строим кривую зависимости

$$E = f(iw) \quad \text{и} \quad \Phi = f_1(iw)$$

или

$$E = f(F) \;\text{ и }\; \Phi = f_1(F),$$

которая и будет представлять характеристику намагничивания машины. На рис. 14 представлена нормальная характеристика намагничивания.

Ввиду особой важности характеристики намагничивания необходим по возможности точный расчет отдельных составляющих $F$, т.е. $2F_\delta = H_\delta l_\delta$; $2F_z = H_z l_z$; $2F_{j1} = H_{j1} l_{j1}$; $2F_m = H_m l_m$; $2F_{j2} = H_{j2} l_{j2}$.

Все эти величины, кроме $F_\delta$, зависят от насыщения железа. Нормально машины работают вблизи колена характеристики намагничивания, и отрезок $F_{Fe}$ соответствует полной м. д. с., необходимой для проведения потока через железо. Отрезок $F_\delta$ соответствует м. д. с. на воздушный зазор. Отношение $\frac{F_{Fe} + F_\delta}{F_\delta}$ характеризует насыщенность машины. В нормальных машинах это отношение составляет 1,15 — 1,2. Таким образом, точность расчета кривой холостого хода сильно зависит от точности определения составляющей падения магнитного напряжения в воздушном зазоре.

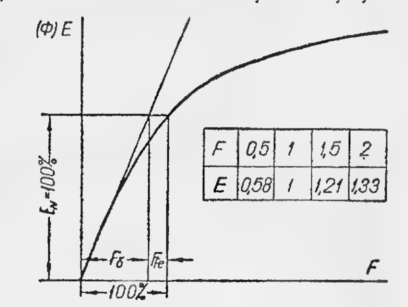


Рис. 14. Нормальная характеристика намагничивания.

## 3-2. М. Д. С. НА ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР. РАСЧЕТНАЯ ДЛИНА ЯКОРЯ

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta'. \tag{10}$$

Здесь

$$\delta' = k_c \delta \tag{11}$$

$\delta'$ — эффективный воздушный зазор;
$\delta$ — действительный зазор;
$k_c$ — коэффициент Картера, учитывающий зубчатость статора и ротора (рис. 15). Согласно [53], [98]

$$\left.\begin{aligned} k_{c1} &= \frac{t_1}{t_1 - b_1} \\ b_1 &= b_0 \frac{b_0}{5\delta + b_0} \end{aligned}\right\}, \tag{12}$$

где $b_0$ — ширина открытия паза (при открытых пазах $b_0 = b_П$);
$b_1$ — расчетная ширина открытия с учетом «расхождения» силовых линий.

Другая формула для $k_c$

$$k_{c1} = \frac{t_1 + 10\delta}{b_z + 10\delta}. \tag{13}$$

При расчете $k_{c2}$ для вторичного якоря в формулах (12) и (13) должны быть взяты соответствующие значения, т. е. $t_2$, $b_2$, $b_{z2}$.

В статоре машины постоянного тока (рис. 16) нет пазов (за исключением машин, имеющих на полюсах компенсационную об-

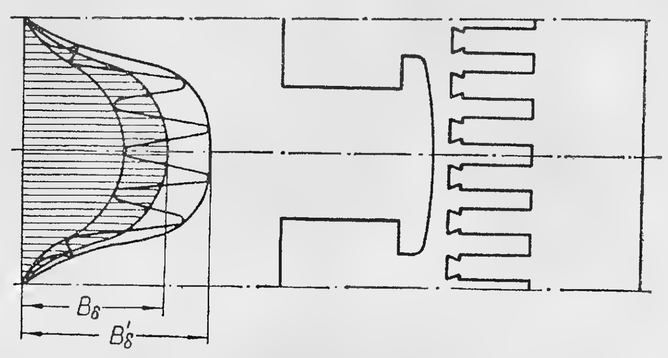



Рис. 15. Определение коэффициента Картера.

мотку). Поэтому $k_{c2} = 1$. Для машин, имеющих зубцы на статоре и роторе, рассчитываются $k_{c1}$ и $k_{c2}$. Общий коэффициент будет равен

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2}.$$

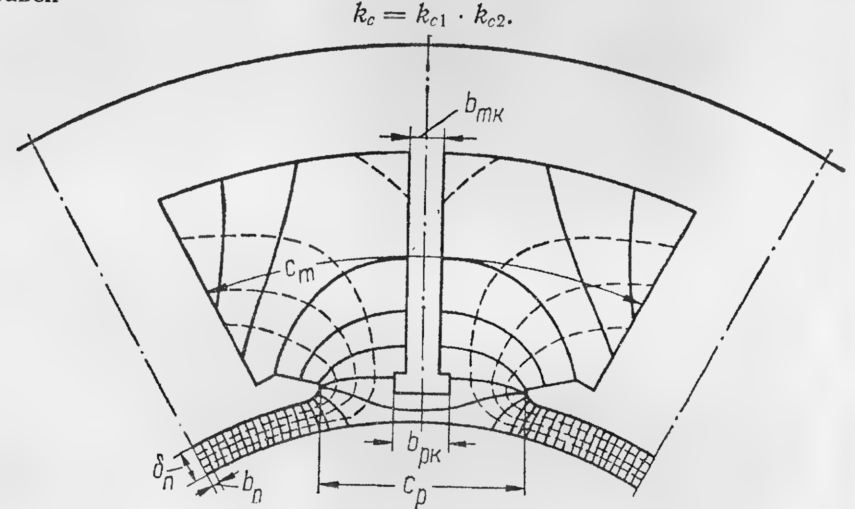



Рис. 16. Магнитная цепь машины постоянного тока.

Действительная максимальная индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i l_i \tau} = \frac{\Phi}{b_i l_i}. \quad (14)$$

Величина $\alpha_i$ зависит от формы поля; согласно рис. 11

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau B_\delta} \int_0^\tau B(x)\, dx = \frac{B_{ср}}{B_\delta}. \quad (15)$$



Для машин постоянного тока

$$\alpha_i = \frac{b_i}{\tau} \approx \frac{b_p + 2\delta}{\tau} \approx \frac{b_p}{\tau} \quad (16)$$

и находится обычно в пределах 0,65 — 0,75.

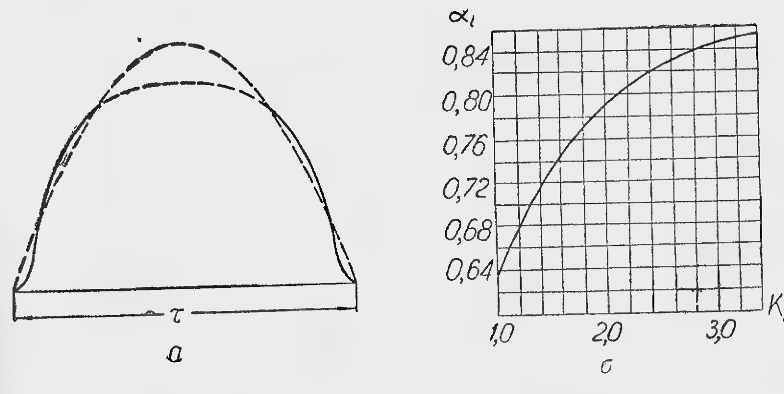



Рис. 17. Определение расчетной полюсной дуги асинхронной машины:
*а* — «уплощение» кривой поля; *б* — кривая коэффициента расчетной полюсной дуги.

Для слабо насыщенных асинхронных и коллекторных машин кривая поля почти синусоидальна и здесь можно принять

$$\alpha_i \approx \frac{2}{\pi}.$$

Для сильно насыщенных машин кривая поля становится в области максимума более плоской (рис. 17,*а*). В этих случаях необходимо учитывать «уплощение» кривой поля по рис. 17,*б*, где $\alpha_i$ дана в зависимости от коэффициента насыщения [71]

$$k_н = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}. \quad (17)$$

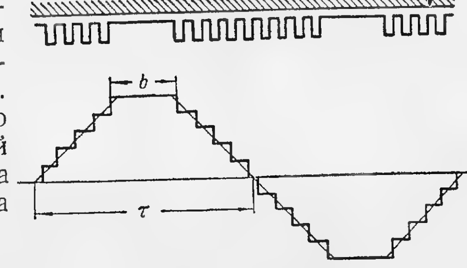



Рис. 18. Кривая м. д. с. ротора неявнополюсной машины.

В синхронных неявнополюсных машинах (турбогенераторах) кривая поля имеет трапецоидальную форму (рис. 18) и здесь, если, как обычно, обмотанная часть ротора составляет около $^2/_3$ полюсного деления, коэффициент $\alpha_i$ близок к его значению для синусоиды, т. е.

$$\alpha_i \approx \frac{2}{\pi}.$$

Для любых отношений обмотанной части к необмотанной $\alpha_i$ можно определить по общей формуле (15), подставив вместо $B(x)$ уравнение трапеции. При этом

$$\alpha_i = 0,5\left(1 + \frac{b}{\tau}\right), \tag{18}$$

где $b$ — необмотанная часть $\tau$.

$$k_1 = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta} = \frac{4}{\pi} \frac{\sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{b}{\tau}\right)}{\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{b}{\tau}\right)} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin\frac{\pi}{2}\gamma}{\gamma}; \quad \gamma = 1 - b/\tau; \tag{19}$$

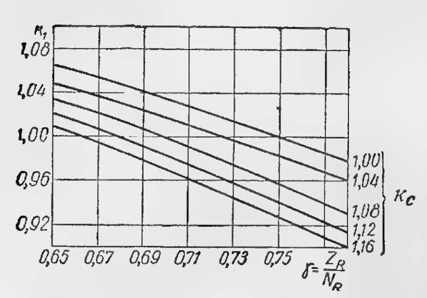



Рис. 19. Определение коэффициента $k_1$ для синхронных неявнополюсных машин.

Более точно $k_1$ определяется по [141], рис. 19 для $1 < k_c < 1,16$.

В синхронных явнополюсных машинах, так же как и в машинах постоянного тока, $\alpha_i$ зависит, главным образом, от $\alpha = \frac{b_p}{\tau}$. Обычно $\alpha$ выбирают в пределах $0,6 < \alpha < 0,75$. Кроме того, $\alpha_i$ зависит от отношения зазора у края полюса $\delta_{max}$ к зазору под серединой $\delta = \delta_{min}$ и отношения $\frac{\delta}{\tau}$. Для получения возможно более близкой к синусоиде формы поля выбирают $\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1,5 - 2$. При этом для среднего значения $\alpha = 0,7$ получается $\alpha_i \approx \frac{2}{\pi}$. Для других значений $\alpha$ и $\frac{\delta_{max}}{\delta}$ величину $\alpha_i$ можно получить методом построения картины силовых трубок [53], [98].

Сопротивление одной силовой трубки на единицу длины машины равно (рис. 16)

$$R_n = \frac{\delta_n}{b_n}. \tag{20}$$

Если построить трубки равного сопротивления так, чтобы

$$R_0 = \frac{\delta_0}{b_0} = R_1 = \frac{\delta_1}{b_1} = R_n = \frac{\delta_n}{b_n}, \tag{21}$$

то при этом потоки трубок будут одинаковыми, а индукция в центре каждой трубки будет обратно пропорциональна ширине $b_n$. Таким образом, получаем поток полюса, равный сумме потоков отдельных трубок

$$\Phi = \mu_0 l_i F n, \tag{22}$$

где $n$ — число трубок на полюс;
$F$ — м. д. с. на полюс,

Индукция в любой точке

$$B_n = \frac{\mu_0 F}{b_n}. \tag{23}$$



Построив кривую $B = f(x)$, определяем величину $\alpha_i$ из условия

$$\alpha_i B_{max} \tau l_i = \Phi = \mu_0 l_i F n. \tag{24}$$

Так как

$$B_{max} = \frac{\mu_0 F}{\delta},$$

то

$$\alpha_i = n\frac{\delta_0}{\tau}. \tag{25}$$

Путем построения картины поля для различных $\alpha$, $\frac{\delta_{max}}{\delta}$ и $\frac{\delta}{\tau}$ были получены кривые коэффициента $k_1$ (рис. 13), коэффициента $k_\Phi$ (рис. 12). Из этих кривых можно получить и $\alpha_i$, так как

$$\alpha_i B_\delta \tau = k_\Phi B_{\delta 1} \frac{2}{\pi}\tau = k_\Phi k_1 B_\delta \frac{2}{\pi}\tau, \tag{26}$$

откуда

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} k_\Phi k_1.$$

Для прямоугольной формы поля (рис. 11,б)

$$k_1 = \frac{4}{\pi}\sin\frac{\pi}{2}\alpha_i. \tag{27}$$

Форма кривой индукции в зазоре зависит от формы полюсного наконечника. Для получения синусоидальной формы индукции зазор делается переменным $\delta_x = f(x)$, и форма полюсного наконечника приобретает особое очертание. Известны три метода **определения наилучшей формы полюсного наконечника**: 1) метод графического построения картины поля в зазоре; 2) метод аналитического решения уравнений поля в зазоре, данный Рихтером Р. [98]; 3) графоаналитический метод, указанный Копняевым П. П. [101].

По первому методу необходимо построить ряд пробных форм и пробных картин поля (рис. 11,а), пока не получится желаемая форма. По второму методу получается уравнение переменного радиуса очертания полюса. Однако, это уравнение неудобно для практического использования.

Более правильно исходить из закона изменения зазора на ширине полюсной дуги. Если необходимо получить синусоидальную индукцию в зазоре

$$B_{\delta x} = B_{\delta max}\cos\frac{\pi}{\tau}x,$$

то при прямоугольной форме кривой м. д. с. надо, чтобы величина зазора изменялась по закону

$$\delta_x = \frac{\delta}{\cos\frac{\pi}{\tau}x}, \tag{28}$$

так как при этом м. д. с. будет

$$F = H_{\delta x}\delta_x = \frac{B_{\delta x}}{\mu_0}\delta_x = \text{const}.$$

Максимальный зазор у края полюса

$$\delta_{max} = \frac{\delta}{\cos\frac{\pi}{\tau}\frac{b_p}{2}} = \frac{\delta}{\cos\alpha\frac{\pi}{2}} \tag{29}$$

и при $\alpha \approx 0,7\ \delta_{max} \approx 2\delta$.

В практике [102] радиус очертания полюса принимают постоянной величиной

$$R_p = \frac{\frac{D}{2}}{1 \pm \frac{4D(\delta_{\max} - \delta)}{b_p^2}} \qquad (30)$$

[для внутриполюсных машин $D$ — диаметр расточки якоря, знак «+»; для внешнеполюсных $D$ — внешний диаметр якоря, знак «—»].

Расчетная длина якоря $l_i$ учитывает радиальные вентиляционные каналы по длине машины. Каналы могут быть как в статоре, так и в роторе (рис. 20). Если каналы имеются только в статоре или только в роторе, расчетная длина, согласно рис. 20, находится из равенства

$$l_i = \sum l_i'.$$

Расчетная ширина пакета

$$l_i' = \int_0^{t''} \frac{B_\delta(x)}{B_\delta}\, dx = l' + b_s',$$

где $l'$ — ширина пакета, а $b_s'$ учитывает расширение силовых линий у краев.

По [98]

$$b_s' = b_s \frac{5\delta}{b_s + 5\delta}. \qquad (31)$$

Разность $b_s - b_s' = b_s''$ представляет потерю длины за счет канала

$$b_s'' = b_s \frac{b_s}{b_s + 5\delta}. \qquad (32)$$

Рис. 20. Определение расчетной длины якоря.

Расчетная длина якоря

$$l_i = \sum l' + n_s b_s', \quad \text{или} \quad l_i = l - n_s b_s'', \qquad (33)$$

где $\Sigma l'$ — сумма длин всех пакетов;
$n_s$ — число каналов;
$b_s$ — ширина канала (обычно $b_s = 1$ *см*).

Полная длина якоря

$$l = \sum l' + n_s b_s = l_i + n_s b_s''. \qquad (34)$$

При наличии в статоре и в роторе одинаковых радиальных каналов, как это делается в асинхронных машинах, полученные выше формулы остаются приблизительно справедливыми. Они приблизительно справедливы и в тех случаях, когда число каналов в статоре и в роторе различно.

В большинстве случаев при одинаковой ширине пакетов можно принимать

$$l_i = (n_s + 1)\, l' + \frac{1}{2} n_s b_s,$$

где $n_s + 1$ — число пакетов.



Если полная длина ротора и полная длина статора отличаются друг от друга не больше чем на величину $8\delta$, то расчетная длина может быть принята равной среднему арифметическому расчетных длин статора и ротора. При больших различиях длин $l_i$ следует определять по меньшей длине с добавкой $\approx 4\delta$. При наличии ступенчатой формы концевых пакетов (рис. 249) добавка получится значительно меньше и может быть получена путем построения силовых трубок или по [102].

По методу [102] расчетными значениями $l_i$ и $b_i$ не пользуются. Вместо расчетной длины пользуются полной длиной, но при расчете эффективного зазора вводят коэффициент Картера $k_c$, учитывающий как наличие пазов, так и наличие каналов в статоре и роторе. В качестве расчетного зазора принимают:

$$\delta'' = \delta + \frac{1}{3}(\delta_{\max} - \delta), \qquad (35)$$

$$k_c = \left(\frac{t_1 + 10\delta''}{b_0 + 10\delta''}\right)\left(\frac{t_2 + 10\delta''}{b_{02} + 10\delta''}\right)\left(\frac{l' + b_s + 10\delta''}{l' + 10\delta''}\right)\left(\frac{l_2' + b_{s2} + 10\delta''}{l_2' + 10\delta''}\right). \qquad (36)$$

М. д. с. на зазор

$$F_\delta = B_\delta \delta'' k_c, \qquad (37)$$

где

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha \tau l}; \qquad (38)$$

$l$ — полная длина железа с каналами;

$\alpha = \frac{b_p}{\tau}$ — полюсное перекрытие.

Более удобным следует признать первый метод, так как он является общим для всех машин и, кроме того, в нем используется понятие действительной максимальной индукции $B_\delta$ и действительного зазора $\delta$ у оси полюса, а не «расчетных» значений этих величин, требующих специального определения.

### 3-3. М. Д. С. НА ЗУБЦЫ

Поток на одно зубцовое деление $t_1$ на оси полюса, где имеет место максимальная индукция, равен (рис. 21,*а*)

$$\Phi_{t1} = B_\delta l_i t_1. \qquad (39)$$

Этот поток частично идет по зубцу, сечение которого равно

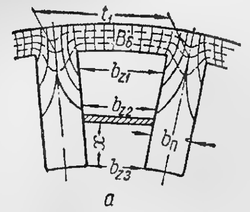
$$S_{zx} = l_{\text{Fe}} b_{zx}; \quad l_{\text{Fe}} = k_{\text{п}} l_1,$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент проклейки пакета;
$l_1$ — длина железа без каналов $l_1 = l - n_s b_s$;
$b_{zx}$ — ширина зубца в месте $x$.

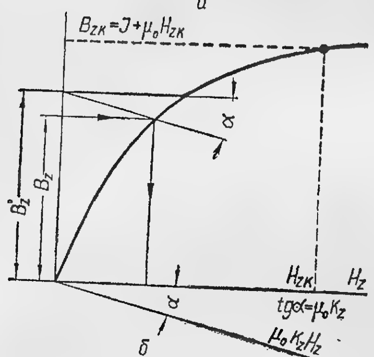
Другая часть потока проходит на ширине паза $b_{\text{п}}$. При индукциях в железе зубцов, меньших 1,8 *вб/м²* (18 000 *гс*), магнитное сопротивление первого пути намного меньше, и можно считать,

что весь поток идет через зубец. При этом условная индукция

$$B'_{zx} = \frac{\Phi_{t1}}{S_{zs}} = \frac{l_i t_1}{l_{Fe} b_{zx}} B_\delta *. \quad (40)$$




*а*




*б*

Рис. 21. Определение м. д. с. на зубцы:

*а* — картина поля; *б* — определение действительной индукции.

Если $B'_{zx} > 18\,000$ *гс*, то необходимо учитывать поток через паз $\Phi_t = \Phi_z + \Phi_п$. Разделив все члены последнего уравнения на $S_{zx}$ и вводя отношение $k_{zx} = \frac{S_{пx}}{S_{zx}}$, получим

$$B'_{zx} = B_{zx} + k_{zx} B_{пx},$$

т. е. действительная индукция в зубцах

$$B_{zx} = B'_{zx} - k_{zx} B_{пx} = B'_{zx} - \mu_0 k_{zx} H_{zx}. \quad (41)$$

На рис. 21,*б* показано графическое определение действительной индукции в зубцах для некоторого значения $k_z$; $\operatorname{tg}\alpha = \mu_0 k_z$.

Величина индукции переменна по высоте $x$ зубца. Для определения $F_z$ находят действительную индукцию $B_{zx}$ в трех сечениях зубца (рис. 21,*а*): у расточки, в середине высоты и у основания зубца и соответствующие им напряженности магнитного поля $H_{z1}$, $H_{z2}$, $H_{z3}$ (или удельные ампер-витки $aw_{z1}$, $aw_{z2}$, $aw_{z3}$), а затем по формуле Симпсона находят эквивалентное значение

$$H_z = aw_z = \frac{1}{6}(aw_{z1} + 4aw_{z2} + aw_{z3}); \quad (42)$$

$$2F_z = l_z aw_z = l_z H_z = 2h_п H_z. \quad (43)$$

Иногда вместо трех сечений берут одно на расстоянии $x = \frac{1}{3} h_п$ от минимального сечения.

## 3-4. М. Д. С. НА ЯРМО ЯКОРЯ

Распределение индукции в ярме электрической машины неравномерно и, следовательно, по любому контуру в ярме индукция переменна. Так как насыщение ярма из экономических соображений берут относительно небольшим и составляющая м. д. с. на ярмо $F_j$ намного меньше $F_\delta$, то практически достаточно вычислить среднюю индукцию

$$B_{j1} = \frac{\Phi_j}{l_{Fe} h_{j_1}}; \quad \Phi_j = \frac{1}{2}\Phi \quad (44)$$

и, считая ее постоянной на длине $l_{j1}$ (рис. 9), определить $F_j$ по формуле $2F_{j1} = H_{j1} l_{j1}$, где $H_{j1}$ находится по кривым намагничивания соответственно данной величине $B_{j1}$*.

Средняя длина магнитной линии в ярме якоря

$$l_{j1} = \frac{\pi(D \pm h')}{2p}, \quad (45)$$

[для внутриякорных машин, рис. 16, знак «—» и для внешнеякорных машин, рис. 9, знак «+»]

$$h' \approx 2h_п + h_j. \quad (46)$$

## 3-5. М. Д. С. НА ПОЛЮСА И ВТОРИЧНОЕ ЯРМО ЯВНОПОЛЮСНОЙ МАШИНЫ

Индукция в полюсе и во вторичном ярме

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m}; \quad B_{j2} = \frac{\Phi_m}{2S_{j_2}}. \quad (47)$$

где $S_m$ — чистое сечение полюса; $S_m = b_m l_p k'_п$;
$k'_п$ — коэффициент заполнения железа с учетом вентиляционных каналов;
$l_p$ — полная длина полюса;
$S_{j2}$ — сечение ярма.

Поток $\Phi_m$ равен полезному потоку плюс поток рассеяния полюса $\Phi_{s2}$. Вычисление потоков рассеяния для различных машин показано в соответствующих разделах при расчете машины. По известной величине $B_m$ находим $H_m$ по кривым для данного сорта стали и получаем

$$2F_m = H_m l_m = H_m 2h_m, \quad (48)$$

где $h_m$ — высота полюса.

Для расчета $F_m$ неявнополюсных синхронных машин применяют более точный метод (гл. 12).

М. д. с. ярма

$$2F_{j_2} = H_{j_2} l_{j_2},$$

где $l_{j_2}$ — длина среднего пути в ярме (рис. 9).

Методы и примеры расчета м. д. с. холостого хода машин и трансформаторов приведены в главах 9—12.

---

* Для асинхронных машин при пользовании кривыми намагничивания с учетом «уплощения» берут вместо $B_\delta$ величину $B_{\delta1}$.

* В приложении II даны кривые для ярма с учетом влияния неравномерности поля.

*Глава четвертая*

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

## 4-1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Понятие «электрические параметры машин» означает обычно их реактивные и активные сопротивления при установившихся и переходных режимах. Реактивные сопротивления определяются величиной потокосцепления контура на единицу тока и частотой. Потокосцепления контуров во всех машинах разделяются на две составляющие:

а) потокосцепления по путям взаимоиндукции;

б) потокосцепления по путям рассеяния.

Это разделение имеет весьма важное значение, так как каждая из составляющих играет особую роль в получении тех или иных рабочих свойств машины или ее характеристик.

Активные сопротивления определяют, с одной стороны, величину потерь в обмотках при установившемся или переходном режиме, а с другой стороны — скорость изменения переходных токов или постоянные времени цепей при заданной индуктивности.

Параметры машины целиком определяют ее электрические свойства, поэтому расчет их является вопросом весьма большой важности при проектировании машин *.

Большое практическое удобство часто представляет процентная или относительная система единиц. Так, например, если принять за единицу полезный поток машины, соответствующий номинальному напряжению на зажимах при холостом ходе, то все потоки можно выражать в долях или процентах от этого потока. Эти числа будут одновременно выражать относительные значения потоков, потокосцеплений и реактивных сопротивлений. Этим обеспечивается простота и наглядность всех расчетов.

Почти каждую электрическую машину мы можем представить в виде трансформатора, имеющего две обмотки — первичную и вторичную.

* В данном параграфе рассматриваются общие для всех машин вопросы расчета параметров. Специфические особенности отдельных видов машин рассмотрены в соответствующих главах.



Потокосцепления этих обмоток при одинаковых числах витков могут быть представлены согласно общей теории электротехники в виде

$$\left.\begin{aligned}\psi_1 &= (L_1 - M)\, i_1 + M\,(i_1 + i_2)\\ \psi_2 &= (L_2 - M)\, i_2 + M\,(i_1 + i_2)\end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где $(L_1 - M)\, i_1 = L_{s1} i_1 = \psi_{s1}$ — первичное потокосцепление рассеяния;
$(L_2 - M)\, i_2 = L_{s2} i_2 = \psi_{s2}$ — вторичное потокосцепление рассеяния;
$M\,(i_1 + i_2) = \psi_m = \psi_{12}$ — потокосцепление взаимоиндукции.

Обмотки, имеющие разное число витков, могут быть приведены к одинаковому числу витков, в частности, к одному витку. В этом последнем случае вместо действительных токов рассматриваются их произведения на число витков, т. е. м. д. с. Очевидно, что при таком приведении электрические свойства цепей не изменяются.

Отношения

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{L_{s1}}{M} = \frac{x_{s1}}{x_{12}}\\ \sigma_2 &= \frac{L_{s2}}{M} = \frac{x_{s2}}{x_{12}}\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

называются первичным и вторичным коэффициентами рассеяния.

Реактивные сопротивления

$$\left.\begin{aligned}x_{s1} &= \omega L_{s1}\\ x_{s2} &= \omega L_{s2}\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

и

называются первичным и вторичным реактивными сопротивлениями рассеяния, а $\omega M = x_m = x_{12}$ — реактивным сопротивлением взаимоиндукции.

Относительными величинами реактивных сопротивлений будут

$$\left.\begin{aligned}x_{s1} &= \frac{x_{s1\,(ом)}\, I_N}{U_N}\\ x_{s2} &= \frac{x'_{s2\,(ом)}\, I_N}{U_N}\end{aligned}\right\}, \qquad (4)$$

*

где $x'_{s2}$ приведено к числу витков и числу фаз первичной цепи.

Так как потокосцепление на единицу тока пропорционально квадрату числа витков, то приведение параметров состоит в умножении на коэффициент $\frac{m_1}{m_2}\left(\frac{w'_1}{w'_2}\right)^2$, равный произведению коэффициентов трансформаций токов и напряжений, причем $w'_1$ и $w'_2$ представляют собой «эффективные» числа витков, умноженные на обмоточные коэффициенты.

Несмотря на свою относительно малую величину ($x_{s1}$ и $x_{s2}$ находятся обычно в пределах 5—10%), реактивные сопротивления рассеяния часто играют решающую роль в работе машины. Существует ложное представление, что рассеяние является «вредным» и что машина была бы идеальной при отсутствии рассеяния. Легко убедиться в том, что если бы рассеяние было равно нулю, работа машин практически была бы невозможной, так как получались бы недопустимые толчки тока при коротких замыканиях,

* Значки $s$ у параметров $x_{s1}$ и $x_{s2}$ в разделе асинхронных машин опущены.

и машина была бы разрушена действием электродинамических сил. «Вредное» влияние рассеяния обычно сказывается на рабочих характеристиках машин (изменение напряжения с нагрузкой, уменьшение коэффициента мощности, к. п. д., ухудшение условий коммутации в коллекторных машинах и т. д.). Расчет рассеяния во всех машинах представляет одну из самых важных и трудных задач электрического расчета. Трудности расчета связаны в ряде случаев с необходимостью вычисления магнитного поля в области проводников с током при сложных граничных условиях. Современная теория электрических машин позволяет решить многие сложные вопросы расчета рассеяния с весьма большой точностью.

Реактивное сопротивление рассеяния разделяется на следующие составляющие:

1) рассеяние паза и коронок зубцов;
2) рассеяние лобовых частей;
3) дифференциальное рассеяние.

## 4-2. РЕАКТИВНОСТЬ РАССЕЯНИЯ ПАЗА

*Случай однослойной диаметральной обмотки и открытого паза* (рис. 22,*а*). Индуктивность катушки с числом витков $w_п$ на активной длине машины $l$ равна сумме потокосцеплений на единицу тока:

$$L = \frac{2w_п\Phi_п}{i}.$$

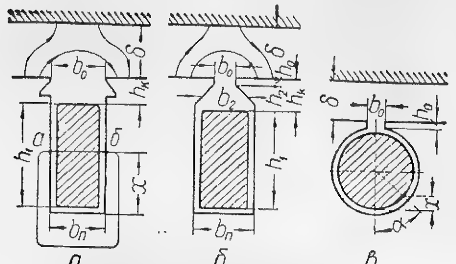


Рис. 22. Формы пазов:
*а* — открытый; *б* — полузакрытый; *в* — круглый.

На высоте $x$, занятой проводниками, напряженность поперечного поля паза $H_x$ равна $w_x i \frac{1}{b_п}$, если пренебречь падением магнитного потенциала в железе*. Индукция в этом месте равна $B_x = \mu_0 H_x = \mu_0 w_x i \frac{1}{b_п}$, где $w_x = w_п \frac{x}{h_1}$.

Приращение потокосцепления на высоте $dx$ равно

$$d\psi_x = B_x dx w_x = \frac{\mu_0}{b_п} w_п^2 i \frac{x^2}{h_1^2} dx.$$

Полное потокосцепление на высоте проводника $h_1$ на единицу осевой длины равно

$$\psi_{h1} = \frac{\mu_0}{b_п h_1^2} w_п^2 i_1 \int_0^{h_1} x^2 dx = \frac{1}{3}\frac{\mu_0}{b_п} h_1 w_п^2 i. \quad (5)$$

---

* $$\int H_l dl = w_x i = \int_a^б H_{Fe} dl + \int_б^a H_x b_п,$$

$H_{Fe}$ — напряженность поля в железе при $\mu = \infty$ равна нулю.



На высоте $h_к$ индукция постоянна и равна

$$B_к = \mu_0 H_к = \mu_0 w_п i \frac{1}{b_п}. \quad (6)$$

Магнитный поток равен $B_к h_к$, а потокосцепление равно $\psi_{hк} = B_к h_к w_п = \mu_0 w_п^2 \frac{h_к}{b_п} i$ (на единицу осевой длины).

Полное потокосцепление одной стороны катушки с $w_п$ витками на единицу тока, или самоиндукция на длине пазовой части, следовательно, равна

$$L_{h1} = \mu_0 w_п^2 \left(\frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_к}{b_п}\right) l_i = \mu_0 w_п^2 \lambda_п l_i. \quad (7)$$

Здесь

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_к}{b_п} \quad (8)$$

представляет проводимость рассеяния паза на единицу длины.

Для вычисления индуктивности на фазу достаточно умножить (7) на число пазов, занятых одной фазой, т. е. на $\frac{Z}{m} = 2pq$.

Пазовая индуктивность одной фазы

$$L_п = 2\mu_0 w^2 l_i \frac{\lambda_п}{pq} \text{ гн}, \quad (9)$$

где $w = w_п pq$ — число витков в фазе.

Вместо расчетной длины $l_i$ с достаточной точностью можно взять действительную активную длину машины $l$.

Реактивное сопротивление пазовой части будет

$$x_п = \omega L_п = 2\pi f \, 2\mu_0 w^2 l_i \frac{\lambda_п}{pq} \text{ ом}. \quad (10)$$

*Случай полузакрытого паза* (рис. 22,*б*). В данном случае индукция на высоте клина $h_к$ меняется. На трапецоидальной части высотой $h_2$ достаточно взять среднюю ширину $b_2$, а на открытии паза ширину $b_0$ и высоту $h_0$. Проводимость паза будет, следовательно, равна

$$\lambda_п = \frac{1}{3}\frac{h_1}{b_п} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{h_0}{b_0}. \quad (11)$$

*Для трапецоидального паза* справедливы формулы для полузакрытого паза при условии подстановки вместо $b_п$ минимальной ширины.

*Для круглого полузакрытого паза* (рис. 22,*в*) проводимость пазового открытия равна $\frac{h_0}{b_0}$, проводимость круговой части можно определить приближенно, если принять, что поле здесь имеет направление по хордам окружности. При этом индукция на высоте $x$ будет

$$B_x = \frac{\mu_0 w_x i}{2R \sin\alpha}, \quad (12)$$

где

$$w_x = w_п \frac{S_x}{\pi R^2} \text{ —} \qquad (13)$$

число витков в сегменте на высоте $x$, $w_п$ — общее число витков в пазу.

Приращение потокосцепления на ширине $dx$

$$d\psi_x = B_x w_x dx = \mu_0 i w_п^2 \left(\frac{S_x}{\pi R^2}\right) \frac{2dx}{2R \sin \alpha}. \qquad (14)$$

Так как сечение сегмента

$$S_x = R^2 (\alpha - 0{,}5 \sin 2\alpha);$$

$$dx = R \sin \alpha \cdot d\alpha,$$

то

$$\psi = \int d\psi_x = \mu_0 i w_п^2 \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\pi} \left(\alpha^2 - \alpha \cdot \sin 2\alpha + \frac{1}{4} \sin^2 2\alpha\right) d\alpha =$$

$$= 0{,}623\, \mu_0 i w_п^2. \qquad (15)$$

В результате получаем проводимость для круглого паза с малым открытием

$$\lambda_п = 0{,}623 + \frac{h_0}{b_0}. \qquad (16)$$

Для закрытого паза проводимость рассчитывается по гл. §11-16.

Двухслойная обмотка с диаметральным шагом рассчитывается аналогично случаю однослойной обмотки, так как токи верхнего и нижнего слоя совпадают по фазе. В качестве высоты $h_1$ необходимо поставить суммарную высоту, занятую обмоткой.

Двухслойная обмотка с сокращенным шагом. Согласно [2] эквивалентная проводимость паза при сокращении шага от $y = 1$ до $y = \frac{2}{3}$ уменьшается в отношении $\frac{3y + 1}{4}$, т. е.

$$\lambda_п = \lambda_{п_{y=1}} \frac{3y + 1}{4}. \qquad (17)$$

При $y = 1$ поправочный коэффициент равен единице.

## 4-3. ВЛИЯНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА НА ВЕЛИЧИНУ $x_п$

Отношение индуктивности при переменном токе к индуктивности при постоянном токе: на высоте паза, занятой обмоткой [98]

$$k'_{xп} = \frac{L'_{п\xi}}{L'_п} = \frac{\lambda'_{п\xi}}{\lambda'_п} = \frac{1}{m^2} \varphi_1(\xi) + \frac{m^2 - 1}{m^2} \cdot \psi_1(\xi), \qquad (18)$$

отношение полных индуктивностей паза

$$k_{xп} = \frac{x_{п\xi}}{x_п} = \frac{\lambda_{п\xi}}{\lambda_п} = \frac{\lambda'_п k'_{xп} + \frac{b_0}{h_0}}{\lambda'_{п.о} + \frac{b_0}{h_0}}.$$



В формуле (18)

$m$ — число стержней, лежащих по высоте паза друг над другом;

$\xi$ — приведенная высота провода [см. формулу (61) гл. 5];

$\varphi_1(\xi)$ и $\psi_1(\xi)$ — функции приведенной высоты, представленные на рис. 23;

$$\varphi_1(\xi) = \frac{3}{2\xi} \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi} \text{ и } \psi_1(\xi) = \frac{1}{\xi} \frac{\operatorname{sh} \xi - \sin \xi}{\operatorname{ch} \xi + \cos \xi}. \qquad (19)$$

Учет вытеснения делается только в случае $\xi > 1$.

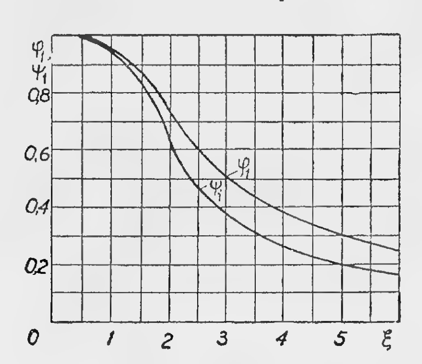



Рис. 23. Кривые влияния вытеснения тока на индуктивность паза.

## 4-4. РЕАКТИВНОСТЬ РАССЕЯНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ

Картина поля рассеяния лобовых частей отличается большой сложностью. Кроме того, она существенно зависит от типа обмотки (двухслойная корзиночная, катушечная с разделенными или неразделенными группами катушек и пр.), от угла наклона лобовой части, наличия магнитных или немагнитных нажимных плит и других факторов [98]. Так как учесть аналитически все эти факторы невозможно, то представляется целесообразным учитывать их опытными коэффициентами. Формула для реактивности лобовых частей $x_л$ может быть написана по аналогии с выведенными выше формулами для пазовой части. Необходимо только учесть следующие общие закономерности.

Потокосцепление рассеяния лобовой части пропорционально длине лобовой части $l_л$ и квадрату числа пазов на полюс и фазу $q^2$, поскольку поток рассеяния в лобовых частях охватывает все $q$ пазов при неподразделенных катушках (рис. 24,*б*) и $\frac{1}{2} q$ пазов при подразделенных катушках (рис. 24,*а*).

В пазовой части потокосцепление рассеяния пропорционально первой степени $q$, так как магнитное сопротивление рассеяния пропорционально $q$, т. е. потокосцепление одного паза получается независимым от рядом лежащих $q - 1$ пазов той же фазы. Поэтому реактивность рассеяния подразделенных лобовых часей $x_л$ меньше, чем неподразделенных.

В соответствии с формулой (10)

$$x_л = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l_i \lambda_л. \qquad (20)$$

Проводимость рассеяния лобовой части для катушечных обмоток: в первом случае (рис. 24,*а*)

$$\lambda_л = \left(0{,}47\frac{l_л}{l_i} - 0{,}3\frac{\tau}{l_i}\right) q, \qquad (21)$$

во втором случае (рис. 24,*б*)

$$\lambda_л = \left(0{,}67\frac{l_л}{l_i} - 0{,}43\frac{\tau}{l_i}\right) q. \qquad (22)$$

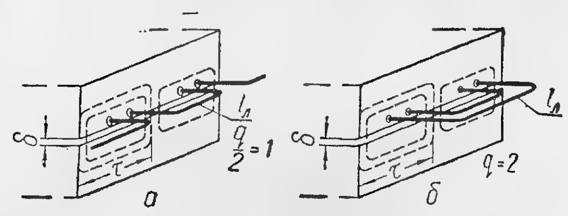



Рис. 24. Лобовые части:
*а* — подразделенные; *б* — неподразделенные.

Для корзиночных обмоток [118], [2]

$$\lambda_л = \frac{k'_л DZ}{2p^2 l_i}\,\frac{3y-1}{2} = k'_л \frac{2m}{\pi}\,\frac{\tau}{l_i}\, q\,\frac{3y-1}{2}. \qquad (23)$$

При $p = 1$ $k'_л = 0{,}45$; при $p > 1$ $k'_л = 0{,}3$; при магнитных бандажах $k'_л = 0{,}7$ для любых $p$.

Коэффициент $0{,}5(3y - 1)$ учитывает уменьшение рассеяния лобовых частей вследствие сокращения шага (при диаметральном шаге он равен единице).

Как видно из сравнения формул для $\lambda_л$, проводимость рассеяния лобовых частей на 1 паз и на единицу длины машины может быть написана для всех типов обмоток в виде

$$\lambda_л = k_л \frac{\tau}{l_i}\, q\,\frac{3y-1}{2}. \qquad (24)$$

Тогда по (23) $k_л = k'_л\frac{2m}{\pi}$, т. е. $k_л = 0{,}86$, 0,57 и 1,34. По (21) и (22), поскольку $l_л = k_1\tau$, получаем:

$$k_л = 0{,}47\,k_1 - 0{,}3 \text{ и } k_л = 0{,}67\,k_1 - 0{,}43.$$

Для обмоток с внешним якорем $k_1 \approx 1{,}8 - 2{,}0$, $k_л = 0{,}64$ и $k_л = 0{,}9$.

Для обмоток с внутренним якорем $k_1 \approx 1{,}2 - 1{,}4$, $k_л = 0{,}36$ и $k_л = 0{,}51$.

Проводимость рассеяния лобовых частей короткозамкнутых роторов асинхронных машин рассмотрена в § 11-16.

Для однофазных машин с $q > 4$

$$\lambda_л \approx 0{,}1\frac{l_л}{l_i} q. \qquad (25)$$



## 4-5. РЕАКТИВНОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИЛИ ДОБАВОЧНОГО РАССЕЯНИЯ

Под дифференциальным рассеянием понимается разность между действительным полем в воздушном зазоре и его основной волной.

Существуют различные методы расчета дифференциального рассеяния: 1) энергетический, 2) гармонического анализа, 3) расчета полей рассеяния в зазоре.

### Энергетический метод

Энергетический метод основан на энергетическом определении индуктивности по уравнению

$$\frac{1}{2} Li^2 = A_m \text{ или } L = \frac{2A_m}{i^2}, \qquad (26)$$

где $A_m$ — запас энергии поля от тока $i$.

Рассчитав запас энергии поля основной волны $A_{m1} = \frac{1}{2} L_{m1} i^2$ и индуктивность от этого поля $L_{m1} = \frac{2A_{m1}}{i^2}$, получим, что дифференциальное рассеяние равно

$$x_\delta = 2\pi f (L - L_{m1}) = 2\pi f L_{m1}\left(\frac{L}{L_{m1}} - 1\right) = x_{m1}\left(\frac{A_m}{A_{m1}} - 1\right), \qquad (27)$$

где

$$x_{m1} = 2\pi f L_{m1}.$$

Отношение запасов энергии $\frac{A_m}{A_{m1}}$ на единицу тока может быть рассчитано следующим образом: строим кривую м. д. с. данной обмотки и определяем амплитуду ее основной волны $F_1$. Энергия поля в зазоре от основной волны пропорциональна квадрату действующего значения $F_1$, т. е. $\left(\frac{F_1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2} F_1^2$.

Энергия поля в зазоре для данной кривой м. д. с. пропорциональна действующему значению этой кривой $F_\partial^2$. Отсюда получаем

$$x_\delta = x_{m1}\left(\frac{2F_\partial^2}{F_1^2} - 1\right). \qquad (28)$$

Если результирующую м. д. с. представить в виде суммы основной волны и ряда гармонических $F = F_1 + \sum_\nu F_\nu$, то действующее значение $F_\partial$ будет равно

$$F_\partial^2 = \frac{1}{2} F_1^2 + \frac{1}{2}\sum_\nu F_{\nu m}^2$$

и по (28)

$$x_\delta = x_{m1} \sum \left(\frac{F_{\nu m}}{F_1}\right)^2. \qquad (29)$$

В действительности, высшие гармонические поля отличаются от высших гармонических м. д. с., так как оказывают влияние реакция вихревых токов и пространственное затухание (§ 6-8). При этом

$$x_\delta = x_{m1} \sum_\nu \left(\frac{F_{\nu m}}{F_1}\right)^2 k^2_{э\nu} = x_{m1} \sum_\nu \left(\frac{k_{w\nu}}{k_w \nu}\right)^2 k^2_{э\nu}, = x_{m1}\,\sigma_\delta, \qquad (30)$$

где $k_{э\nu}$ — коэффициент экранирования и пространственного затухания.

При подсчете $x_\delta$ по формуле (30) без учета $k_{э\nu}$ можно воспользоваться табл. 4.

*Таблица 4*

**Коэффициенты рассеяния в воздушном зазоре**

| $q$ | $\sigma_\delta \cdot k^2_{w_1} = \sum \left(\frac{k_{w\nu}}{\nu}\right)^2$; | | | $\nu = 5, 7, 11, 13\ldots$ |
|---|---|---|---|---|
| 2 | $y = 1$ 0,0265 (0,0717) | $y = 0{,}835$ 0,0205 | $y = 0{,}66$ 0,0199 | $y = 0{,}50$ 0,0133 |
| 3 | $y = 1$ 0,0129 (0,0388) | $y = 0{,}89$ 0,0103 | $y = 0{,}78$ 0,009 | $y = 0{,}666$ 0,0097 |
| 4 | $y = 1$ 0,0082 (0,0270) | $y = 0{,}92$ 0,0066 | $y = 0{,}835$ 0,0055 | $y = 0{,}75$ 0,0054 |
| 5 | $y = 1$ 0,0059 (0,0216) | $y = 0{,}935$ 0,0050 | $y = 0{,}865$ 0,0038 | $y = 0{,}735$ 0,0038 |
| 6 | $y = 1$ 0,0047 (0,0187) | $y = 0{,}80$ 0,0025 | $y = 0{,}60$ 0,0034 | $y = 0{,}40$ 0,0013 |
| 7 | 0,0040 (0,0169) | 0,0018 | 0,003 | 0,001 |
| 8 | 0,0035 (0,0157) | 0,0015 | 0,0026 | 0,001 |
| 9 | 0,0032 (0,0149) | 0,0012 | 0,0023 | 0,0008 |
| 10 | 0,0030 (0,0143) | 0,001 | 0,0022 | 0,0008 |
| ∞ | 0,00215 (0,0119) | 0,0002 | 0,0015 | 0,0004 |

Примечание. Числа в знаменателе в скобках для двухфазных и однофазных машин.

Влияние реакции на гармонические с малым полюсным делением незначительно. Если не учитывать реакцию, то $F_\partial$ можно найти



графически, разделив кривую м. д. с. на $k$ равноотстоящих ординат $f_1, f_2, f_3$ и т. д. и взяв сумму

$$F_\partial^2 = \frac{1}{k}\left[f_1^2 + f_2^2 + \ldots + f_k^2\right], \qquad (31)$$

по (28) определить $x_\delta$.

### Метод гармонического анализа

Пространственные гармонические поля якоря, созданные током якоря, индуктируют в якоре э. д. с. нормальной частоты, но во вращающемся роторе они индуктируют э. д. с. разных частот. Пространственные гармонические иногда разделяются на высшие и зубцовые. Первые создают так называемое поясовое рассеяние, а вторые — зубцовое рассеяние, или зигзаг-рассеяние [2], [53]. Потокосцепление какой-либо гармонической порядка $\nu$ равно

$$\psi_\nu = \Phi_\nu w k_{w\nu}, \qquad (32)$$

где $\Phi_\nu$ — поток;

$w$ — число витков;

$k_{w\nu}$ — коэффициент обмотки, причем для обмоток с $q =$ ц.ч.

$$k_{w\nu} = k_{p\nu} k_{y\nu};\; k_{p\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{2m}}{q \sin \nu \frac{\pi}{2mq}};\; k_{y\nu} = \sin \nu \frac{\pi}{2} y. \qquad (33)$$

Магнитный поток $\Phi_\nu$, индукция $B_\nu$ и м. д. с. $F_\nu$ для гармоники порядка $\nu$ в зазоре равны

$$\Phi_\nu = \frac{2}{\pi} l_i \frac{\tau}{\nu} B_\nu \text{ и } B_\nu = \mu_0 F_\nu \frac{1}{\delta'_\nu}, \qquad (34)$$

где

$$F_\nu = \frac{1}{\nu} F_1 \frac{k_{w\nu}}{k_{w1}};\; F_1 = \frac{\sqrt{2m}}{\pi p} w k_{w_1} I_1, \qquad (35)$$

$F_\nu$ — м. д. с. $\nu$-й гармонической, $F_1$ — м. д. с. основной волны;

$\delta'_\nu = \frac{\delta'}{k_\nu k_{э\nu}}$ — эффективный зазор для $\nu$-й гармоники с учетом коэффициента Картера, коэффициента пространственного затухания поля в зазоре и коэффициента ослабления от обратного действия вихревых токов (§ 5-2).

Подставляя значения $\Phi_\nu$ в (32), получаем потокосцепление $\nu$-й гармонической в зазоре

$$\psi_\nu = \mu_0 \frac{2}{\pi} l_i \frac{\tau}{\nu} F_\nu w k_{w\nu} \frac{1}{\delta'_\nu}. \qquad (36)$$

Потокосцепление от основной волны в зазоре равно

$$\psi_1 = \mu_0 \frac{2}{\pi} l_i \tau F_1 w_1 k_{w\nu} \frac{1}{\delta'} \qquad (37)$$

и определяет величину реактивного сопротивления взаимоиндукции основной волны:

$$x_m = \frac{\psi_1}{\sqrt{2} I_1} 2\pi f = 2\pi f \mu_0 l_i \frac{m}{\pi} \frac{w^2}{p} k_w^2 \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{\delta}\ \text{ом} \tag{38}$$

или в относительных единицах

$$x_m = \frac{E_{aN}}{U_N} = \frac{\Phi_{aN}}{\Phi_N} = \frac{F_{1N}}{F_N}, \tag{39}$$

где $E_{aN} = I_{1N} x_m$ — э. д. с. от потока якоря при $I_1 = I_N$,

$$B_N = \frac{\Phi_N \pi}{\tau l_i 2}, \quad \Phi_N = \frac{U_N}{\pi \sqrt{2} f w k_w}, \tag{40}$$

$F_N = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta N} \delta'$ — м. д. с. в зазоре. Здесь и далее $k_w = k_{w1}$ по (33) при $\nu = 1$.

По аналогии с (38) реактивное сопротивление от потока $\nu$-й гармоники в зазоре равно

$$x_{m\nu} = 2\pi f \mu_0 l_i \frac{m}{\pi} \frac{w^2}{p} \frac{k_{w\nu}^2}{\nu} \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{\nu \delta'_\nu}, \tag{41}$$

или

$$x_{m\nu} = \left(\frac{k_{w\nu}}{k_w} \frac{1}{\nu}\right)^2 k_{э\nu} x_m. \tag{42}$$

Эффективный зазор $\delta'_\nu$ для $\nu$-й гармоники отличается от $\delta'$ для основной волны вследствие различного характера поля в зазоре.

Сумма всех $\nu$ гармоник будет, следовательно, представлять дифференциальное рассеяние

$$x_\delta = x_m \sum \left(\frac{k_{w\nu}}{k_w} \frac{1}{\nu}\right)^2 k_{э\nu} = x_m \sigma_\delta, \tag{43}$$

где

$$\sigma_\delta = \sum \left(\frac{k_{w\nu}}{k_w} \frac{1}{\nu}\right)^2 k_{э\nu}. \tag{44}$$

При этом $\sigma_\delta$ называется коэффициентом рассеяния в зазоре или коэффициентом дифференциального рассеяния; $\delta'/\delta'_\nu = k_{э\nu}$.

Сравнивая $x_\delta$ по уравнениям (30) и (43), видим, что при энергетическом методе расчета влияние пространственного затухания и экранирования выражалось коэффициентом $k_{э\nu}^2$, а здесь $k_{э\nu}$, т. е. энергетическое и статическое определения индуктивности дают несколько отличные результаты.

Как сказано выше, дифференциальное рассеяние разлагают на зубцовое и поясовое:

$$x_\delta = x_z + x_B = x_m(\sigma_z + \sigma_B) = x_m \sigma_\delta. \tag{45}$$

Зубцовое рассеяние $x_z$ соответствует зубцовым гармоническим (рис. 25, *б*), а поясовое $x_B$ — высшим пространственным гармоническим при распределенной обмотке, т. е. при $q = \infty$,



Обе составляющие $x_\delta$ могут быть найдены, следовательно, по формулам:

$$x_z = x_m \sum \left(\frac{k_{w\nu z}}{k_w} \frac{1}{\nu_z}\right)^2 k_{э\nu z} = x_m \sigma_z, \tag{46}$$

$$x_B = x_m \sum \left(\frac{k'_{w\nu}}{k_w} \frac{1}{\nu}\right)^2 k_{э\nu B} = x_m \sigma_B, \tag{47}$$

где в соответствии с уравнением (44) величины $\sigma_z$ и $\sigma_B$ представляют коэффициенты зубцового и поясового рассеяния. Так как коэффициент обмотки $k_{w\nu z}$ для зубцовых гармоник равен коэффициенту основной волны ($k_{w\nu z} = k_w$), то

$$x_z = x_m \sum \left(\frac{1}{\nu_z}\right)^2. \tag{48}$$

Влиянием реакции на зубцовые гармонические можно пренебречь ($k_{э\nu z} = 1$). Порядок $\nu_z$ зубцовой гармонической, как известно, равен

$$\nu_z = 1 \pm 2qmk, \tag{49}$$

где $k$ — любое целое число, начиная с единицы. При $k = 1$ получаем первую зубцовую гармонику. Знак «плюс» соответствует прямобегущим, а знак «минус» обратнобегущим зубцовым гармоникам.

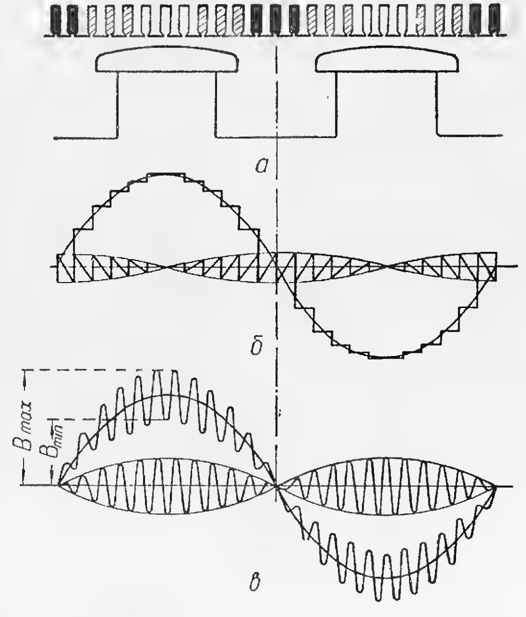



Рис. 25. Зубцовые гармонические:
*а* — расположение полюсов; *б* — гармонические, вызываемые током якоря; *в* — гармонические, вызываемые потоком якоря.

$$\sigma_z = \sum \left(\frac{1}{k2qm \pm 1}\right)^2 = \left(\frac{1}{2qm+1}\right)^2 + \left(\frac{1}{2qm-1}\right)^2 + \left(\frac{1}{4qm+1}\right)^2 + \ldots \tag{50}$$

Так как обычно $k2qm \gg 1$, то приближенно

$$\sigma_z = 2\left(\frac{1}{2qm}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{1}{k}\right)^2\right] = 0{,}82\left(\frac{1}{qm}\right)^2 = 0{,}82\left(\frac{2p}{Z}\right)^2. \tag{51}$$

Это же выражение получено в [45] в результате подробного анализа.

Для синхронных машин

$$x_z \approx \frac{5}{8} x_{ad} \left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2. \tag{52}$$

Поясное рассеяние $x_B = x_m\sigma_B$ можно определить, подсчитав сумму в уравнении (47). Результаты подсчета представлены на рис. 26. В обмотках с $q =$ ц. ч. имеют место гармоники порядка

$$\nu = 6k + 1,$$

где $k = \pm 1, \pm 2$ и т. д.

Для шестизонных обмоток с $0,6 < y < 1,2$

$$\sigma_B \approx 0,0012\left(1 + 0,7\cos\frac{y - 0,6}{0,2}\pi\right)k_э, \quad (53)$$

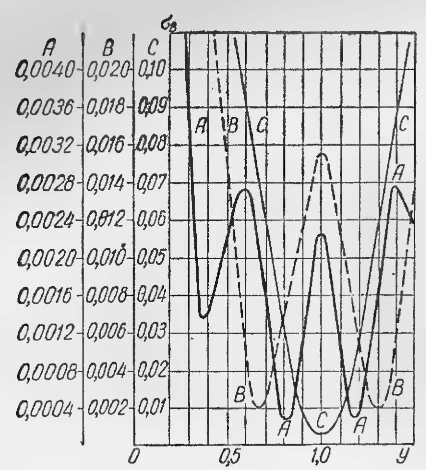



Рис. 26. Зависимость коэффициента $\sigma_B$ от шага обмотки:

*A* — трехфазная машина, фазовый пояс 60°;
*B* — двухфазная машина, фазовый пояс 90°;
*C* — трехфазная машина, фазовый пояс 120°.

где $k_э$ — эффективный коэффициент экранирования. Для турбогенераторов $k_э \approx 0,6$, для асинхронных двигателей и синхронных машин можно полагать $k_э \approx 1$.

В обмотках с дробным $q$ или в трехзонных обмотках в полюсопереключаемых асинхронных двигателях дифференциальное рассеяние может сильно возрасти. По этой причине на применение дробных обмоток в асинхронных машинах следует итти с большой осторожностью, так как при этом может получиться не только большое рассеяние, приводящее к уменьшению перегрузочной способности двигателя, но и паразитные моменты от высших гармоник.

Дифференциальное рассеяние по вышеприведенному методу рассчитывалось независимо для статора и ротора. В действительности дифференциальное рассеяние статора и ротора взаимно связано. Точное дифференциальное рассеяние возможно получить из общих уравнений равновесия э. д. с. первичной и вторичной обмоток. Для симметричной многофазной машины при синусоидальном токе приложенное напряжение уравновешивается суммой активного падения напряжения $Ir_1$ и реактивного падения напряжения от рассеяния в пазах статора и лобовых частях ($x_{п1} + x_{л1} = x_{п.л1}$), а также суммой э. д. с., индуктированных вращающимися полями в зазоре от м. д. с. статора и ротора: $jI_1\sum_\nu x_{1m\nu}$ и $j\sum_\nu I_{2\nu}x_{21\nu}$. При этом принимаются во внимание пространственные гармонические статора и ротора, индуктирующие в статоре э. д. с. частоты приложенного напряжения. Необходимо различать реактивность взаимоиндукции $\nu$-й гармонической по отношению к первичной ($x_{1m\nu}$) и вторичной ($x_{2m\nu}$) обмотке и индуктивность взаимоиндукции

$$x_{12\nu} = x_{21\nu} = x_{1m\nu}\left(\frac{k_{12\nu}}{k_{11\nu}}\right)^2 = x_{2m\nu}\left(\frac{k_{21\nu}}{k_{22\nu}}\right)^2,$$



где $k_{12\nu}$ — обмоточный коэффициент обмотки ротора по отношению к $\nu$-й гармонической м. д. с. статора;
$k_{21\nu}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора по отношению к $\nu$-й гармонической м. д. с. ротора;
$k_{11\nu}$ и $k_{22\nu}$ — обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора по отношению к $\nu$-й гармонической.

При распределенных ($q = \infty$) обмотках и без скоса пазов

$$k_{12\nu} = k_{11\nu} = k_{22\nu} = k_{21\nu}.$$

Сказанное выше можно представить уравнением:

$$\dot U_1 = \dot I_1(r_1 + jx_{п.л1}) + j\dot I_1\sum_\nu x_{1m\nu} + j\sum_\nu \dot I_{2\nu}x_{21\nu}. \quad (54)$$

В роторе при $U_2 = 0$ (короткозамкнутая обмотка)

$$0 = I_{2\nu}\left(\frac{r_{2\nu}}{s_\nu} + jx_{п.л\,2\nu}\right) + jI_{2\nu}x_{2m\nu} + jI_1x_{12\nu}. \quad (55)$$

При этом

$x_{п.л2\nu} \approx x_{п.л\,2}$, $r_{2\nu} \approx r_2$ (без учета вытеснения тока),
$s_\nu = 1 - \nu(1 - s)$ — скольжение $\nu$-й гармонической.

Из (55) получаем

$$\dot I_{2\nu} = -\dot I_1\frac{jx_{12\nu}}{\frac{r_{2\nu}}{s_\nu} + j(x_{п.л2\nu} + x_{2m\nu})}. \quad (56)$$

Подставляя значение $I_{2\nu}$ в уравнение (54), получим

$$\dot U_1 = \dot I_1\left[(r_1 + jx_{п.л1}) + j\sum_\nu\left(x_{1m\nu} - \frac{x_{12\nu}^2}{\frac{r_{2\nu}}{js_\nu} + x_{22\nu}}\right)\right], \quad (57)$$

где $x_{22\nu} = x_{2m\nu} + x_{п.л2\nu}$.

Выделяя основную волну $\nu = 1$ и отделяя вещественные и мнимые члены, получим

$$\dot U_1 = \dot I_1\left[\left(r_1 + \frac{r'_{21}}{s} + \sum_{\nu\neq 1}\frac{r'_{2\nu}}{s_\nu}\right) + j\left(x_{п.л1} + x_{1m} - \frac{x_{1m}^2k_{12}^2x_{22}}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_{22}^2}\right) + \sum_{\nu\neq 1}\left(x_{1m\nu} - \frac{x_{1m\nu}^2k_{12\nu}^2x_{22\nu}}{\left(\frac{r_{2\nu}}{s_\nu}\right)^2 + x_{22\nu}^2}\right)\right], \quad (58)$$

где

$$\frac{r'_{2\nu}}{s_\nu} = \frac{r_{2\nu}}{s_\nu}\cdot\frac{x_{1m\nu}^2k_{12\nu}^2}{\left(\frac{r_{2\nu}}{s_\nu}\right)^2 + x_{22\nu}^2}. \quad (58a)$$

Полученное выражение является общим и дает возможность правильного определения не только параметров схемы замещения, но также величины моментов вращения и потерь.

Последний член уравнения (58) под знаком суммы представляет эффективное рассеяние от всех гармоник.

При $\frac{r_{2\nu}}{s_\nu} \ll x_{22\nu}$ получим

$$x_\delta = \sum_{\nu \neq 1} \left( x_{1m\nu} - \frac{x_{1m\nu}^2 k_{12\nu}^2}{x_{22\nu}} \right) = \sum_{\nu \neq 1} x_{1m\nu} \left( 1 - \frac{k_{12\nu}^2}{1 + \sigma_{2\nu}} \right), \qquad (59)$$

где

$$\sigma_{2\nu} = \frac{x_{\text{п.л}2\nu}}{x_{2m\nu}}, \quad x_{2m\nu} \approx x_{1m\nu} \text{ (в долях единицы).}$$

Другой крайний случай при $s_\nu = 0$ дает $x_\delta = \sum_{\nu \neq 1} x_{1m\nu}$.

Разница между этими двумя случаями невелика ввиду малости $k_{12\nu}^2$ и большой величины $\sigma_{2\nu}$, поэтому можно считать для статорной обмотки $x_\delta$ всегда по (59).

Второй и третий члены уравнения (58) при $\frac{r_2}{s} \ll x_{2m} + x_{\text{п.л }2}$ и при одной обмотке на роторе дают реактивность короткого замыкания $x_\text{к}$

$$x = x_\text{к} = x_{\text{п.л }1} + x_{1m} - \frac{x_{1m}^2 k_{12}^2}{x_{2m} + x_{\text{п.л }2}} + x_\delta = x_{\text{п }1} + x_{\text{л }1} + x_\delta +$$

$$+ x_{1m} \left( 1 - \frac{k_{12}^2}{1 + \sigma_2} \right) = x_{\text{п}1} + x_{\text{л }1} + x_\delta + \frac{x_{\text{п }2} + x_{\text{л }2}}{1 + \sigma_2} + x_{1m} \frac{1 - k_{12}^2}{1 + \sigma_2}. \qquad (60)$$

Если вторичная обмотка является беличьей клеткой, то для нее

$$k_{12\nu} = k_{\text{р}\nu} k_{\text{с}\nu},$$

где

$k_{\text{р}\nu}$ — коэффициент распределения;

$k_{\text{с}\nu}$ — коэффициент скоса пазов.

Для основной волны ($\nu = 1$) и для высших гармонических ($\nu =$ ц. ч.)

$$k_{\text{р}\nu} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \nu}{\frac{\alpha}{2} \nu}; \qquad k_{\text{с}\nu} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2} \nu \frac{b}{t}}{\frac{\alpha}{2} \nu \frac{b}{t}}, \qquad (61)$$

где

$\alpha$ — угол между соседними пазами ротора в электрических градусах; $\alpha = \frac{2\pi}{Z_2} p$;

$\frac{b}{t}$ — отношение скоса к шагу паза.

Подставляя значение $k_\text{р}$ и $k_\text{с}$ по (61) для $\nu = 1$ и разлагая синус в ряд, получим, беря первые два члена разложения,

$$x_{\delta 2} = x_{1m} \frac{1 - k_{12}^2}{1 + \sigma_2} = x_{1m} \frac{1 - k_\text{р}^2 k_\text{с}^2}{1 + \sigma_2} \approx x_{1m} 0{,}82 \left( \frac{1}{mq} \right)^2 \left( 1 + \frac{b^2}{t^2} - 0{,}2 \frac{b^4}{t^4} \right), \qquad (62)$$

где

$mq$ — равно числу пазов на полюс, $\frac{b}{t} \leqslant 1$.

Выше без учета скоса мы получили

$$x_{\delta_2} = x_{1m} \sigma_{z2},$$

где

$$\sigma_{z2} = 0{,}82 \left( \frac{1}{mq} \right)^2.$$



Как видно, при $\frac{b}{t} \leqslant 1$ скос может быть учтен путем введения величины

$$\sigma_{z2} = 0{,}82 \left( \frac{1}{mq} \right)^2 \left( 1 + \frac{b^2}{t^2} - 0{,}2 \frac{b^4}{t^4} \right). \qquad (63)$$

При $\frac{b}{t}$* $> 1$ надо пользоваться общими выражениями (58).

Выражение (58) дает возможность определить полные потери в меди в долях от номинальной мощности

$$p_{\text{Cu}} = I_1^2 \left( r_1 + r'_{21} + \sum_{\nu \neq 1} r'_{2\nu} \right)$$

и полный момент вращения с учетом паразитных моментов от высших гармонических в долях от номинального момента

$$M = \sum_\nu M_\nu = I_1^2 \left[ \frac{r'_{21}}{s} + \sum_{\nu \neq 1} \nu \frac{r'_{2\nu}}{s_\nu} \right],$$

где $r'_{21}$ по (58а) при $\nu = 1$.

Номинальная мощность и номинальный момент определяются в виде:

$$P_N = 3 U_\text{ф} I_\text{ф} \text{ вт};$$

$$M_N = P_N \frac{p}{2\pi f_1} \text{ дж.}$$

## Метод расчета полей рассеяния в зазоре (рассеяние коронок зубцов)

В машинах с **большим воздушным зазором** (синхронных) поток рассеяния замыкается по зазору между коронками соседних зубцов (рис. 22). Это рассеяние в данном случае можно просто прибавить к пазовому рассеянию, введя проводимость по коронкам зубцов.

Согласно [102] проводимость рассеяния по коронкам зубцов на один паз и на единицу длины равна

$$\lambda_k = \frac{5\delta}{5b_0 + 4\delta} \left( \frac{3y + 1}{4} \right), \qquad (64)$$

где $\delta$ — длина воздушного зазора;

$b_0$ — ширина открытия паза, и, в соответствии с формулой (10) для $x_\text{п}$, реактивность рассеяния по коронкам зубцов равна

$$x_{kz} = 2\pi f 2 \mu_0 w^2 l_i \frac{\lambda_k}{pq}. \qquad (65)$$

В машинах с **малым зазором** (асинхронных) рассеяние коронок входит в состав дифференциального рассеяния статора и ротора

$$x_\delta = x_B + x_{kz}. \qquad (66)$$

* Увеличение скоса свыше $\left( \frac{b}{t} = 1 \right)$ нецелесообразно, так как это приводит к большому увеличению рассеяния $x_{\delta 2}$. Если скос пазов произведен в статоре, то выражение $\sigma_{z2}$ по (63) относится к статору.

В этом случае проводимость коронок зубцов определяется шагом и шириной зубца, а также воздушным зазором $\delta$.

В случае полузакрытых пазов для статора

$$\lambda_{k_1} = \frac{[t_2 - (b_{01} + b_{02})]}{10\delta}\left(\frac{3y+1}{4}\right) \tag{67}$$

и для фазного ротора

$$\lambda_{k_2} = \frac{[t_1 - (b_{01} + b_{02})]}{10\delta}\left(\frac{3y+1}{4}\right). \tag{68}$$

Согласно [2] для турбогенераторов проводимость коронок равна

$$\lambda_{k_1} = \frac{b_{z_1}}{t_1}\left(0{,}35 + \frac{b_{z_1}}{8\delta}\right)\frac{3y+1}{4}, \tag{69}$$

или по [71]

$$\lambda_{k1} = \frac{5\delta}{5b_0 + 4\delta}. \tag{69а}$$

## Дифференциальное рассеяние в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу

В обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{bd + c}{d} = \frac{N}{d}, \tag{70}$$

кроме высших гармонических, появляются также низшие гармонические (порядок которых лежит ниже порядка основной волны), а также дробные гармонические. Однако эти гармонические почти целиком демпфируются обратным действием вихревых токов, особенно при наличии короткозамкнутой обмотки на роторе. Поэтому в большинстве случаев достаточно учитывать только высшие гармонические.

Полный спектр гармонических при дробной трехфазной шестизонной обмотке может быть определен по формуле [146]

$$\nu = \frac{6k}{d} + 1, \tag{71}$$

где $k = 0;\ \pm 1;\ \pm 2;\ \pm 3$ и т. д. Знаки «+» соответствуют прямо, а знаки «—» обратно вращающимся волнам.

Зубцовые гармонические, имеющие порядок $\nu_z = k_1\, 2mq \pm 1$, где $k_1 = \pm 1;\ \pm 2;\ \pm 3$ и т. д., входят также в (71). При $m = 3$, $k = k_1 qd$ и при трехзонной обмотке

$$\nu = \frac{3k}{d} + 1.$$

Дифференциальная реактивность при дробной обмотке может быть определена также по (43) или (59). При этом сумма должна быть взята для всех $\nu$, за исключением $\nu = 1$.

Обмоточные коэффициенты $\nu$-й гармоники при дробных обмотках равны [146]

$$k_{w\nu} = k_{p\nu} k_{y\nu};\quad k_{p\nu} = \frac{\sin N\dfrac{\alpha_\nu}{2}}{N \sin\dfrac{\alpha_\nu}{2}};\quad k_{y\nu} = \sin\left(\frac{\pi}{2}\, y_w \nu\right). \tag{72}$$



В коэффициент распределения входит $\alpha_\nu$, представляющий угол между векторами звезды пазов для $\nu$-й гармонической, номера которых отличаются на «шаг вектора» в звезде пазов для основной волны.

$$y_w = \frac{1 + mgN}{d},$$

где $m$ — число фаз;

$N$ и $d$ — числитель и знаменатель дроби (70);

$g$ — минимальное целое число, при котором $y_w =$ ц. ч.

При $g$ — четном, $d$ — нечетном

$$\alpha_\nu = \nu\alpha_1 d y_w.$$

При $g$ — четном, $d$ — четном

$$\alpha_\nu = \nu\alpha_1 d y_w + 180°.$$

При $g$ и $d$ нечетных

$$\alpha_\nu = \nu\alpha_1 d y_w + 180° d.$$

Для порядков гармонических, удовлетворяющих условию

$$\frac{\nu p}{3} \neq \text{ц. ч.},$$

в формуле (72)

$$\sin N\frac{\alpha_\nu}{2} = \sin 30° = 0{,}5.$$

Для $\nu = 1$

$$k_{p\nu} = \frac{0{,}5}{N \sin\dfrac{30°}{N}}.$$

Для определения $x_\delta$ по (43) целесообразно также разделение его на составляющие $x_z$ и $x_B$. При этом можно принять, что $x_z = x_m \sigma_z$ в соответствии с формулой (45) или более точно по [146]

Рис. 27. Коэффициент рассеяния в зазоре при дробных обмотках.

$$\sigma_z = \left(\frac{1}{d}\right)^2\left[\frac{1}{(-6q+1)^2} + \frac{1}{(6q+1)^2} + \frac{1}{(-12q+1)^2} + \frac{1}{(12q+1)^2}\right]. \tag{73}$$

(При $d$ четном вместо $d$ следует подставить $d/2$.)

При суммировании выражения

$$\sigma_B = \sum_\nu \left(\frac{k_{w\nu}}{k_{w_1}\nu}\right)^2$$

необходимо учитывать только величины $\nu > 1$, так как низшие гармонические сильно ослабляются вихревыми токами в роторе. Величина $\sigma_B$ представлена на рис. 26.

Для некоторых значений $q$ при определении $\sigma_\delta$ возможно пользоваться рис. 27.

Коэффициент экранирования может быть принят равным единице.

Приближенная формула (53) для $\sigma_B$ может быть применена и в данном случае.

Реактивность дифференциального рассеяния получится в виде

$$x_\delta = x_m \sigma_\delta,$$

где $\sigma_\delta = \sigma_z + \sigma_B$, $\sigma_z$ по (51), (63) или по (73).

## Дифференциальное рассеяние обмотки возбуждения синхронной машины

В случае неявнополюсных синхронных машин дифференциальное рассеяние обмотки возбуждения включает рассеяние в зазоре между коронками зубцов и рассеяние от высших гармонических поля возбуждения. В явнополюсных синхронных машинах рассеяние в зазоре включает лишь потоки высших гармонических и для них согласно уравнению (30) без учета экранирования

$$x_{\delta_2} \equiv x_{\delta f} = \sigma_{\delta_2} x_a,$$

где $\sigma_{\delta_2} = \sum\limits_{\nu=3,\,5,\,7,\,\dots} \left(\frac{B_\nu}{B_1}\right)^2 = \frac{8}{\pi^2} f_B^2 k_ф^2 - 1$; $f_B$ и $k_ф$ по рис. 12 (под знак суммы не должны входить гармонические насыщения, так как учитываются только поля, пропорциональные току).

Для турбогенераторов (см. § 12-3)

$$\boldsymbol{x}_{\delta_2} \approx x_{zR}.$$

### 4-6. ОБЩАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ $x_s$

Объединяя составляющие $x_s$, получим общую формулу

$$x_s = x_п + x_л + x_\delta = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l_i [\lambda_п + \lambda_л] + x_m \sigma_\delta \ ом, \tag{74}$$

или, что одно и то же,

$$x_s = x_п + x_л + x_\delta = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l_i \sum \lambda \ ом, \tag{75}$$

где

$$\sum \lambda = \lambda_п + \lambda_л + \lambda_\delta, \tag{76}$$

причем из уравнений (38), (64) и (71) следует выражение для проводимости рассеяния в зазоре $\lambda_\delta$, приведенной к одному пазу и единице длины без учета скоса пазов

$$\lambda_\delta = \frac{Z_1 \tau k_w^2}{2p\pi^2\delta} \sigma_\delta = \frac{k_w^2 t}{\pi^2 \delta'} \left[0{,}82 + \left(\frac{Z_1}{2p}\right)^2 \sigma_B\right]. \tag{77}$$

При скосе пазов по (63) вместо 0,82 надо ввести $0{,}82\left(1 + \frac{b^2}{t^2} - \frac{0{,}2b^4}{t^4}\right)$ для $\frac{b}{t} \leqslant 1$. При короткозамкнутых обмотках $\sigma_B = 0$. При подсчете реактивности якоря все величины обычно обозначаются индексом «1», в данном случае этот индекс опущен. При расчете реактивности вторичного якоря употребляется индекс «2». Таким образом, формулы для реактивностей вторичного якоря будут иметь тот же вид, но надо подставить соответствующие величины, например $w = w_2$, число пазов на полюс и фазу $q = q_2$, обмоточный коэффициент, $k_w = k_{w_2}$, коэффициент рассеяния в зазоре $\sigma_\delta = \sigma_{\delta_2}$, шаг зубца $t_1 = t_2$ и т.д.



Случай вторичного якоря явнополюсной машины при числе фаз $m_2 = 1$ рассмотрен в § 12-24. Если $\lambda_k$ рассчитывается по формуле (69а) для синхронных машин, то

$$x_s = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l_i (\lambda_п + \lambda_л + \lambda_k) + \sigma_\delta x_{ad} \ ом. \tag{78}$$

Для получения формул в относительных единицах разделим реактивное сопротивление в омах на базовое, или номинальное, сопротивление

$$z_N = \frac{U_N}{I_N} = \frac{\pi \sqrt{2} \Phi_N w k_{wf}\,*}{I_N} \tag{79}$$

или, вводя амплитуду основной волны м. д. с., получим

$$z_N = \frac{2m(wk_w)^2 f \Phi_N}{pF_1} \ ом. \tag{80}$$

Получаем $x_s$ в относительных единицах

$$\boldsymbol{x}_s = \frac{x_{s\,(ом)}}{z_{N\,(ом)}} = \frac{\left(4\pi f \mu_0 w^2 l_i \frac{\lambda_п + \lambda_л}{pq} + x_{m\,(ом)}\sigma_\delta\right) F_1 p}{2m(wk_w)^2 f \Phi} = \frac{2\pi\mu_0 F_1 l_i}{\Phi k_w^2} \frac{\lambda_п + \lambda_л}{mq} + \boldsymbol{x}_m \sigma_\delta. \tag{81}$$

Здесь $\boldsymbol{x}_m$ — реактивное сопротивление взаимоиндукции в долях единицы, причем

$$\boldsymbol{x}_m = \frac{F_1}{F_N}, \tag{82}$$

т. е. относительная реактивность $\boldsymbol{x}_m$ равна отношению амплитуды основной волны м. д. с. якоря при номинальном токе к амплитуде основной волны м. д. с. зазора при номинальном потоке.

Вместо (81) можно написать также другое выражение, если принять во внимание (76) и (77), т. е.

$$\boldsymbol{x}_s = \frac{2\pi\mu_0 F_1 l_i}{\Phi k_w^2} \left(\frac{\lambda_п + \lambda_л + \lambda_\delta}{mq}\right). \tag{83}$$

Здесь выражение в скобках представляет собой проводимость рассеяния на один полюс на единицу длины, в то время как $\lambda_п$, $\lambda_л$ и $\lambda_\delta$ представляет проводимости на одно пазовое деление.

Представление относительных реактивных сопротивлений в форме отношения $\frac{A}{B_\delta}$.

$$\boldsymbol{x} = k \frac{A}{B_{\delta N}}, \tag{84}$$

где $k$ — const;

$A$ — линейная нагрузка при $I = I_N$;

$B_{\delta N}$ — основная волна индукции при $E = U_N$.

* В дальнейшем индекс $N$ у потока $\Phi$ и м. д. с. $F_1$ опускается, т. е., если нет особой оговорки, $\Phi$ и $F_1$ представляют их номинальные значения.

Это представление реактивностей оказывается весьма удобным в практике, так как выражается через удельные нагрузки и основные размеры машин.

Реактивное сопротивление взаимоиндукции. Согласно (82)

$$x_m = \frac{\mu_0 F_1}{B_{\delta_t}\delta'}. \tag{85}$$

Так как линейная нагрузка

$$A = \frac{2mwI}{2p\tau},$$

то основная волна м. д. с. якоря на полюс

$$F_1 = \frac{m\sqrt{2}}{\pi p} I_1 w k_w = \frac{\sqrt{2}}{\pi} A\tau k_w. \tag{86}$$

Подставляя значение $F_1$ в (85), получим

$$x_m = \frac{\mu_0 \sqrt{2} A\tau k_w}{\pi B_{\delta_1}\delta'} = k_m \frac{A}{B_{\delta_1}}, \tag{87}$$

где

$$k_m = \frac{\mu_0 \sqrt{2} k_w \tau}{\pi\delta'}.$$

Реактивное сопротивление рассеяния. Подставляя в (81) вместо $F_1$ его значение и вместо $\Phi$ его величину $\frac{2}{\pi} B_{\delta_1}\tau l_i$, а также подставляя выражения проводимостей из формул (11), (24), (77) и $x_m$ из (87), получим после преобразований

$$x_s = \left(\frac{2\pi\mu_0 A}{\sqrt{2} B_{\delta_1} k_w}\right)\frac{\Sigma\lambda}{mq} = k_{s\lambda}\frac{A}{B_{\delta_1}}, \tag{88}$$

где

$$k_{s\lambda} = \frac{\sqrt{2}\mu_0\pi}{k_w}\frac{\Sigma\lambda}{mq}.$$

Принимая во внимание формулы (8), (24), (44), (51) и (53) получим

$$k_{s\lambda} = \mu_0\left[k_п \frac{h_п}{\lambda\tau} + k''_л \frac{\tau}{l} + k_\delta \frac{\tau}{\delta}\left(\frac{2p}{Z}\right)^2\right], \tag{89}$$

где

$$k_п = \frac{\pi\sqrt{2}}{k_w}\frac{3y+1}{4}\frac{\lambda_п}{h_п} b_п; \quad \lambda = \frac{b_п}{t_1}.$$

Для открытого паза при $y = 1$

$$k_п = \frac{\pi\sqrt{2}}{k_w}\frac{3y+1}{4}\frac{h_1 + 3h_к}{3h_п} \approx 1{,}6 \div 2;$$

$$k''_л = \frac{\pi\sqrt{2}}{k_w} 0{,}2\frac{3y-1}{2} \approx 0{,}94;$$

$$k_\delta = \frac{\sqrt{2}}{\pi} k_w\left[0{,}82\left(1 + \frac{b^2}{t_1^2}\right) + (mq)^2 \sigma_B k_э\right] \approx 0{,}45$$

($k_\delta \approx 0{,}45$ при $b = 0$ и малых величинах поясового рассеяния).



Из формул (87) и (89) весьма наглядно видна зависимость параметров от удельных нагрузок $A$ и $B_\delta$, а также от таких фундаментальных соотношений, как $\frac{\tau}{\delta}$; $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$; $\beta = \frac{\tau}{l_i}$; $\frac{2p}{Z}$; $\lambda = \frac{b_п}{t_1}$.

Для конструктора это представляет большое удобство в особенности при проектировании серий, так как позволяет наглядно видеть влияние отдельных величин на реактивность и пути получения заданной реактивности.

Реактивные сопротивления несимметричных и переходных режимов $x_0$, $x_2$, $x''_d$, $x'_d$ и соответствующие постоянные времени рассмотрены в гл. 12. Там же на конкретных примерах показаны и все особенности расчета параметров машин.

## 4-7. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ РЕАКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Насыщение стали приводит к увеличению магнитного сопротивления путей рассеяния для поперечного поля пазов, а также высших гармонических поля в зазоре. Точный учет увеличения магнитного сопротивления связан с известными трудностями. Приближенно влияние насыщения зубцов на пазовую проводимость можно учесть, добавляя к ширине паза в § 4-2 ширину зубца, деленную на относительную магнитную проницаемость зубца. Последняя является переменной для различных сечений по высоте паза. Однако, учитывая наличие в зубцах основного поля, можно принять некоторое эффективное значение проницаемости

$$\mu' = \frac{B_{zk}}{\mu_0 (H_{zk} + A_N I)}, \tag{90}$$

где $A_N$ — номинальная линейная нагрузка;

$I$ — ожидаемая кратность тока якоря $\left(I = \frac{I}{I_N}\right)$;

$B_{zk}$ и $H_{zk}$ — «критическая» индукция и напряженность по кривой намагничивания

$$B_{zk} = 2{,}04 \cdot 10^{-4}; \; H_{zk} \approx 300 \; а/см.$$

Таким образом, получаем вместо уравнения (11) насыщенное значение пазовой проводимости для полузакрытого или открытого паза

$$\lambda_{п.н} = \left(\frac{h_0}{b'_0} + \frac{1}{3}\frac{h_п}{b'_п}\right)\frac{3y+1}{4}, \tag{91}$$

где

$$b'_0 = b_0 + \frac{b_{z_0}}{\mu'} \quad и \quad b'_п = b_п + \frac{b_{z\,ср}}{\mu'}. \tag{92}$$

Для закрытых пазов о влиянии насыщения см. § 11-16.

Насыщенное значение реактивности рассеяния в воздушном зазоре $x_{\delta н}$ определяется практически результирующей м. д. с. статора и ротора и величиной воздушного зазора. Поэтому его можно приближенно определить так же, как и для $x_m$, т. е.:

$$x_{mн} = \frac{x_m}{k_н}; \tag{93}$$

$$x_{\delta н} = \frac{x_\delta}{k_н}; \tag{94}$$

$$\lambda_{\delta н} = \frac{\lambda_\delta}{k_н}, \tag{95}$$

где $k_н$ — коэффициент насыщения по (17), гл. 3.

Как показывают расчеты, учет влияния насыщения имеет смысл главным образом при расчете пускового тока и пускового момента. Влияние насыщения на рабочие характеристики нормальных машин весьма незначительно. Согласно данным опыта насыщенное значение $x_{к.н}$ при пусковом токе меньше $x_к$ в машинах с открытыми пазами на 5—10%, в машинах с полузакрытыми пазами на 10—25%, в машинах с закрытыми пазами ротора на 35—50%.

### 4-8. АКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Активные сопротивления рассчитываются по известной формуле

$$r_{(ом)} = \rho \frac{l_w w}{q_ф}, \tag{96}$$

где $\rho$ — удельное сопротивление меди (обычно приводится к 75° C);
$l_w$ и $w$ — длина и число витков в фазе;
$q_ф = \frac{I}{s}$ — сечение меди провода на фазу;
$s$ — плотность тока.

Относительная величина активного сопротивления

$$r_1 = \frac{r_{(ом)} I_{1N}}{U_{1N}} \tag{97}$$

показывает одновременно относительные потери в меди машины. Расчет относительной величины $r_2$ вторичной обмотки требует приведения $r_2$ к числу витков первичной, т. е. $r_2 = \frac{r'_{2\,(ом)} I_{1N}}{U_{1N}}$. Определение $r'_{2\,(ом)}$ сделано в соответствующих разделах книги применительно к различным типам машин.

---

*Глава пятая*

# ПОТЕРИ И К. П. Д.

## 5-1. ОСНОВНЫЕ ПОТЕРИ В ЖЕЛЕЗЕ

Потери в электрических машинах определяют величину коэффициента полезного действия и экономичность машины в целом. С другой стороны, они определяют нагревание машины и, в известной мере, надежность и долговечность машин.

Потери разделяются: а) на электромагнитные — потери в меди и в стали; б) на механические, состоящие из потерь на вентиляцию и потерь на трение в подшипниках. Электромагнитные потери в меди и в стали разделяются на основные и добавочные. Под основными следует понимать потери от рабочего тока в меди и от основного потока в стали. Под добавочными — потери от вихревых токов в меди обмотки и потери от высших гармонических статора и ротора.

Уменьшение потерь и повышение к. п. д. — одна из основных задач конструктора. Но, как показано в § 2-1, уменьшение электрических потерь, если оно достигается только уменьшением плотности тока и индукции, приводит к возрастанию стоимости материалов машины. Существует такой процент электрических потерь для машины заданной мощности, при котором машина будет наиболее экономичной. Там же показано, что существует закон распределения потерь, согласно которому достигается оптимальный к. п. д. машины. В данной главе рассматриваются методы расчетного определения различных потерь.

Удельные потери в листовой стали на гистерезис *(вт/кг)* при переменном перемагничивании пропорциональны квадрату индукции и первой степени частоты (для индукции выше 10 000 *гс*)

$$p'_г = \sigma_г f B^2, \tag{1}$$

где $\sigma_г$ — постоянная, зависящая от сорта стали (табл. 5), а $B$ — *вб/см*$^2$.

При индукциях меньших 10 000 *гс* более точные результаты получаются по известной формуле Штейнметца [71]

$$p'_г = \eta f B^{1,6} \tag{2}$$

или по [98]

$$p'_{\text{г}} = (a'B + b'B^2)\, f, \qquad (3)$$

где $\eta$, $a'$, $b'$ — постоянные * сорта стали.

При неравномерности индукции, возникающей при высоких частотах, необходимо ввести коэффициент увеличения $k_{m\text{г}}$ (рис. 29).

Формула для потерь на вихревые токи в листах стали может быть получена следующим путем. Рассмотрим 1 *см*² листа толщиной $\Delta$. Пусть индукция направлена, как и следует, вдоль стенок листа и изменяется во времени синусоидально (рис. 28). Применяя закон электромагнитной индукции и закон Ома к контуру шириной $dx$, получим

$$p_x = \frac{E_x^2}{r_x}; \; E_x = \pi\sqrt{2}\Phi_x f; \; \Phi_x = B \cdot 2x.$$

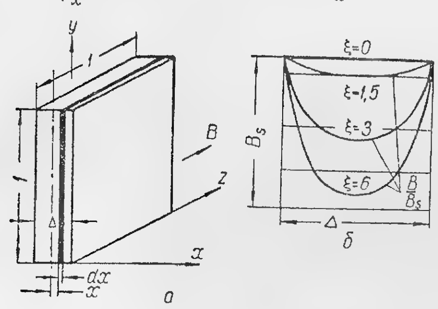



Рис. 28. Потери на вихревые токи:
*а* — элемент листовой стали; *б* — распределение индукции по толщине листа.

Так как сопротивление контура $r_x = \rho \frac{2}{dx}$, то суммарные потери

$$p_\Delta = \int_0^{\frac{\Delta}{2}} \frac{\pi^2 f^2}{\rho} \Phi_x^2\, dx = \frac{(2\pi f B)^2}{\rho} \int_0^{\frac{\Delta}{2}} x^2 dx = \frac{(\pi f B)^2}{6\rho} \Delta^3.$$

Разделив на объем элемента, равный $\Delta \times 1 \times 1$ *см*³, получим потери на единицу объема, а разделив на удельный вес, получим потери на единицу веса, *вт/кг*

$$p'_{\text{ф}} = \frac{(\pi f \Delta B)^2}{6\rho\gamma} = \sigma_{\text{ф}} (\Delta B f)^2, \qquad (4)$$

где

$$\sigma_{\text{ф}} = \frac{\pi^2}{6\rho\gamma}.$$

Для стали с $\rho = 2 \cdot 10^{-5}$ *ом.см* и $\gamma = 7{,}8 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*³ $\sigma_{\text{ф}} = 10{,}5 \cdot 10^6$.

Значение $\sigma_{\text{ф}}$ и $\sigma_{\text{г}}$, а также суммарные потери $p'_{10}$ при индукции 10 000 *гс* для различных сортов стали приведены в табл. 5.

* Для динамной стали $\Delta = 0{,}5$ *мм*, $a' = 0{,}009$, $b' = 0{,}035$; для легированной — $a' = 0{,}004$, $b' = 0{,}026$ при $B$ в *вб/м*².



При точных расчетах рекомендуется брать цифры удельных потерь для *данной марки* стали (приложение II).

На рис. 28,*б* приведено распределение индукции по толщине листа для различных значений «приведенной толщины» листа $\xi = \alpha\Delta$; $\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2\rho}}$. При большой толщине листа $\Delta$ или высокой частоте формула (4) дает *преувеличенные* результаты для потерь на вихревые токи, так как поле вихревых токов ослабляет вызывающее их поле.

Для учета обратного действия потери по уравнению (4) надо умножить на коэффициент

$$k_m = \frac{3}{\xi} \frac{\text{sh}\,\xi - \sin\xi}{\text{ch}\,\xi - \cos\xi}. \qquad (5)$$

Кривая $k_m$ в функции $\xi$ приведена на рис. 29. В пределах $2 < \xi < 3$, $k_m \approx \frac{6}{8+\xi}$; при $\xi > 3$, $k_m = \frac{3}{\xi}$ [98].

Потери на гистерезис, наоборот, возрастают с ростом $\xi$ (высокие частоты или большая толщина листа). Для учета увеличения потерь уравнение (1) необходимо умножить на коэффициент $k_{m\text{г}}$ (рис. 29),

$$k_{m\text{г}} = \frac{\xi}{2} \frac{\text{sh}\,\xi + \sin\xi}{\text{ch}\,\xi - \cos\xi}. \qquad (6)$$

В качестве индукции $B$ необходимо подставлять среднюю индукцию по ширине листа, т. е. частное от деления потока на общую площадь магнитопровода.

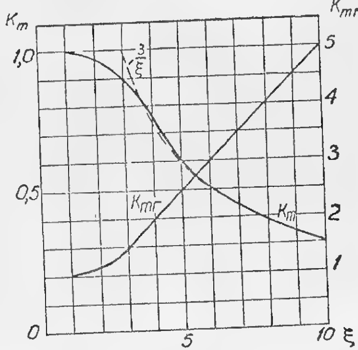



Рис. 29. Коэффициенты потерь на вихревые токи $k_m$ и на гистерезис $k_{m\text{г}}$ в функции $\xi$.

Потери на гистерезис в зубцах

$$p_{\text{г}z} = \sigma_{\text{г}} f B^2 G_z k_{m\text{г}}, \qquad (7)$$

где $G_z$ — вес зубцов ($B > 10\,000$ *гс*).

В качестве индукции достаточно взять среднюю индукцию в зубцах. Для частот $0 < f < 100$ *гц* и толщины листа $\Delta = 0{,}5$ *мм*

$$k_{m\text{г}} \approx 1.$$

Потери на вихревые токи в зубцах

$$p_{\text{ф}z} = \sigma_{\text{ф}} (f\Delta B)^2 G_z k_m{}^*. \qquad (8)$$

*Таблица 5*

**Постоянные потерь в стали**

| Сорт листовой стали | $\sigma_{\text{г}}$ | $\sigma_{\text{ф}}$ | $p_{10}$ (в *вт/кг*) |
|---|---|---|---|
| Обыкновенная динамная | $4{,}8 \cdot 10^6$ | $19{,}2 \cdot 10^6$ | 3,6 |
| Слаболегированная | $4{,}7 \cdot 10^6$ | $10{,}4 \cdot 10^6$ | 3 |
| Среднелегированная | $3{,}8 \cdot 10^6$ | $6{,}4 \cdot 10^6$ | 2,3 |
| Высоколегированная | $2{,}85 \cdot 10^6$ | $4{,}4 \cdot 10^6$ | 1,7 |

* Для частот $0 < f < 100$ $k_m \approx 1$.

Так как кривая поля в зазоре имеет высшие гармонические, то уравнение (8) при учете влияния гармонических умножают на коэффициент

$$k'_{\text{ф}z} = \frac{B_{\delta_1}^2 + 4B_{\delta_2}^2 + 9B_{\delta_3}^2}{B_{\delta_1}^2}.$$

Для машин постоянного тока считают $k'_{\text{ф}z} \approx 2$.

Для машин переменного тока с синусоидальной формой поля, при $f = 50$ *гц* без учета увеличения потерь от обработки можно считать

$$p'_{\text{ф}z} = p_{10}\left(\frac{B}{10^{-4}}\right)^2 \text{ вт/кг, если } B \text{ выражено в вб/см}^2$$

или

$$p'_{\text{ф}z} = p_{10}\left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 \text{ вт/кг, если } B \text{ выражено в гс} \qquad (9)$$

При переменной частоте потери необходимо считать по уравнениям (12) и (13), полагая $k'_{z\text{ф}} \approx 1$, так как в машинах переменного тока потери от гармоник в зубцах рассчитываются отдельно.

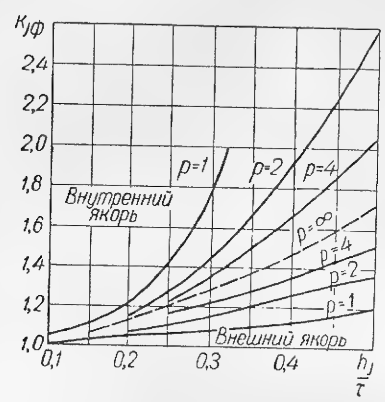



Рис. 30. Коэффициент увеличения потерь на вихревые токи в ярме.

Потери в ярме. Полученные выводы для *потерь на гистерезис* строго справедливы для переменного перемагничивания. В случае *вращательного* перемагничивания, имеющего место в ярме электрической машины, потери на гистерезис могут отличаться от потерь, вычисленных по формулам (1) и (2). При $B = 15\,000$ *гс*, согласно опыту, потери при переменном и вращательном перемагничивании можно принять одинаковыми. По данным [98] потери по уравнению (7) для учета вращательного перемагничивания умножают на поправочный коэффициент $k_{1\text{г}} = 1{,}8$. Кроме того, вводится поправочный коэффициент $k_{2\text{г}}$ на неравномерность индукции. По данным [98] $k_{2\text{г}} \approx 1{,}1$.

Потери на гистерезис в ярме

$$p_{j\text{г}} = \sigma_{\text{г}} k_{j\text{г}} f B_j^2 G_j, \qquad (10)$$

где $k_{j\text{г}} = k_{1\text{г}} k_{2\text{г}}$ и в среднем равно $1{,}8 \cdot 1{,}1 \approx 2$.

Потери на вихревые токи в ярме будут также больше, чем по уравнению (4), если в ярме считать среднюю индукцию $B_j$. Причина лежит в неравномерности индукции и появлении дополнительных вихревых токов. Поправочный коэффициент $k_{j\text{ф}}$ может быть взят по кривым рис. 30.

$$p_{j\text{ф}} = \sigma_{\text{ф}} k_{j\text{ф}} (f \Delta B_j)^2 G_j. \qquad (11)$$

В среднем для нормальных отношений $\frac{h_j}{\tau}$ коэффициент $k_{j\text{ф}} = 1{,}2 - 1{,}5$.



Вследствие обработки потери увеличиваются. Увеличение потерь на гистерезис связано с влиянием резки и штамповки на пограничный слой стали, а увеличение потерь на вихревые токи — с наличием заусениц.

Коэффициент увеличения потерь от обработки зависит от качества обработки. При хороших штампах потери на гистерезис увеличиваются в 1,2 раза, а потери на вихревые токи в 1,5 раза. Приняв эти коэффициенты увеличения, получим окончательные формулы для расчета потерь при $B > 10\,000$ *гс*.

Потери в зубцах

$$p_z = (\sigma_{\text{г}} k_{z\text{г}} f + \sigma_{\text{ф}} k_{z\text{ф}} f^2 \Delta^2)\, B_{z\,\text{ср.}}^2 G_z; \qquad (12)$$

для машин постоянного тока $k_{z\text{г}} \approx 1{,}2$; $k_{z\text{ф}} \approx 3$; для синхронных и асинхронных машин $k_{z\text{г}} \approx 1{,}2$; $k_{z\text{ф}} \approx 1{,}5$.

Потери в ярме

$$p_j = (\sigma_{\text{г}} k_{j\text{г}} f + \sigma_{\text{ф}} k_{j\text{ф}} f^2 \Delta^2)\, B_j^2 G_j, \qquad (13)$$

где для всех машин можно принять

$$k_{j\text{г}} \approx k_{j\text{ф}} \approx 2{,}4.$$

Иногда потери на гистерезис и вихревые токи определяются в суммарном виде. Так как потери на гистерезис пропорциональны первой степени частоты, а потери на вихревые токи — квадрату частоты, то суммарные потери при толщине листа 0,5 *мм* оказываются пропорциональными частоте в степени 1,3 в пределах $0 < f < 200$; при этом получаются следующие формулы:

потери в стали ярма

$$p_j = k_j p'_j \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_j; \quad p'_j \approx p_{10}\left(\frac{B_j}{10^{-4}}\right)^2, \qquad (14)$$

где $k_j$ — коэффициент увеличения потерь, соответствующий приведенным выше коэффициентам $k_{j\text{г}}$ и $k_{j\text{ф}}$. Для машин свыше 100 *ква* $k_j = 1{,}3$, а для машин ниже 100 *ква* $k_j = 1{,}5$;

потери в зубцах

$$p_z = k_z p'_z \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_z; \quad p'_z \approx p_{10}\left(\frac{B_z}{10^{-4}}\right)^2, \qquad (15)$$

где $k_z$ — коэффициент увеличения потерь, соответствующий приведенным выше коэффициентам $k_{z\text{г}}$ и $k_{z\text{ф}}$. Для машин свыше 100 *ква* $k_z = 1{,}7$, а для машин ниже 100 *ква* $k_z = 2$*.

Для различных типов машин приводятся также формулы в примерных расчетах.

## 5-2. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ В ЖЕЛЕЗЕ

Добавочные потери возникают в меди и в железе статора и ротора.

Добавочные потери в железе вызываются в основном высшими и зубцовыми гармоническими поля статора и ротора. Частота пуль-

* Для турбогенераторов эти коэффициенты несколько отличны от приведенных и даны в гл. 12.

саций этих полей изменяется от 150 *гц* (3-я гармоническая) до десятков тысяч герц. Амплитуда их обычно падает с ростом частоты. Эти гармонические вызывают вихревые токи и явление гистерезиса в железе зубцов и на поверхностях статора и ротора.

Целесообразно добавочные потери разделить на потери холостого хода $p_{доб\,(х.\,х)}$ (точнее потери, вызываемые потоком машины $p_{доб\,(U)}$) и на потери короткого замыкания $p_{доб\,(к.\,з)}$ (точнее потери, вызываемые нагрузочными токами (м. д. с.) статора и ротора $p_{доб\,(I)}$). Суммарные потери будут тогда

$$p_{доб} = p_{доб\,(U)} + p_{доб\,(I)}. \qquad (16)$$

К добавочным потерям от нагрузочного тока следует отнести также потери в нажимных плитах, щитах и крайних пакетах активной стали от вихревых токов, вызываемых полями рассеяния лобовых частей. Допустимая величина добавочных потерь приведена в § 2-3.

### Поверхностные потери холостого хода

В синхронных машинах и машинах постоянного тока индукция по внешней поверхности сплошного или набранного из листов полюсного наконечника вследствие наличия пазов и зубцов якоря колеблется с периодом, соответствующим зубцовому делению $t_1$ с максимальным значением $B_{max}$ под серединой зубца и $B_{min}$ под серединой паза (рис. 25,*в*).

Амплитуда этого колебания (см. рис. 15)

$$B_0 = \frac{1}{2}(B_{max} - B_{min}) = (k_C - 1) B_\delta. \qquad (17)$$

Частота пульсаций зубчатости $f_z = Zn = f_1\left(\frac{Z}{p}\right)$.

Задача о расчете потерь на поверхности ферромагнитных тел представляет весьма большую важность и была исследована многими авторами [2], [76], [98].

Решение обычно получается путем аналогий с задачей о потерях в листе. Нам представляется более правильным другой путь решения, а именно: нахождение выражения максимальной плотности тока на поверхности через действительное значение нормальной составляющей индукции на поверхности. Это действительное значение $B$ является результатом сложения внешнего вынуждающего поля $B_0$ (причины) и поля вихревых токов $B_r$ (следствия), рис. 31, *а* и *б*. Однако размагничивающее влияние реакции поля вихревых токов на основное поле для высших гармонических невелико, поэтому в ряде случаев его можно учитывать введением «коэффициента поверхностной реакции» $k_{r\nu}$.

Амплитуда плотности тока на поверхности при движении синусоидальной волны индукции $B$ (рис. 31,*а*) со скоростью $v$ по закону электромагнитной индукции и закону Ома равна

$$s_{\nu\,max} = \frac{B_\nu \cdot v_\nu}{\rho} = \frac{B_\nu \tau_\nu \omega_\nu}{\pi\rho}\ а/см^2. \qquad (18)$$



Так как действующее значение тока по направлению в глубь металла $y$ убывает по закону $s_\nu = s_{0\nu} e^{-\alpha y}$ * (без учета изменения магнитной проницаемости), то потери на 1 $см^2$ будут

$$p_0' = \rho \int_0^\infty s_{0\nu}^2 e^{-2\alpha y} dy = \rho\,\frac{s_0^2}{2\alpha} = \rho\,\frac{s_{\nu\,max}^2}{4\alpha}. \qquad (19)$$

Подставляя значение $s_{\nu\,max}$ из (18), получим потери на единицу поверхности массивного ротора

$$p_0' = \frac{B_\nu^2 \tau_\nu^2 \omega_\nu^2}{4\pi^2 \rho\alpha} = \frac{\sqrt{2}\, B^2 \omega_\nu^{1,5} \tau_\nu}{4\pi^2 \sqrt{\mu\rho}} = k_0' (B_\nu 2\tau_\nu)^2 f^{1,5}, \qquad (20)$$

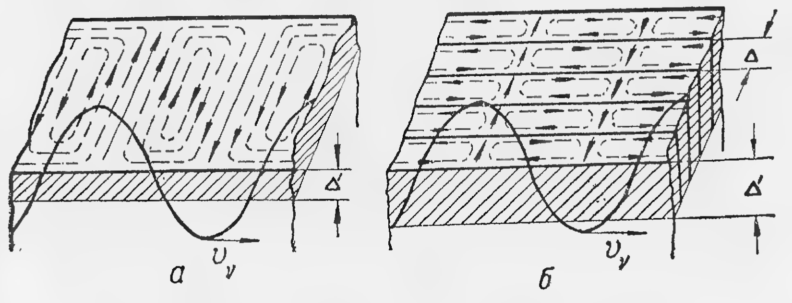



Рис. 31. Вихревые токи на поверхности:
*а* — сплошная поверхность; *б* — расслоенная поверхность.

где $B_\nu$ — действительная нормальная составляющая индукции на поверхности;

$\tau_\nu$ — полюсное деление данной гармонической;

$k_0'$ — «постоянная» потерь

$$k_0' = \frac{1}{4\sqrt{\pi\mu\rho}}. \qquad (20а)$$

Постоянная $k_0'$ является функцией величины $\sqrt{\mu\rho}$, т. е. зависит от рода материала, температуры и насыщения. Значение $\mu$ зависит от *тангенциальной* составляющей индукции $B_{x\nu}$, которая связана с величиной нормальной составляющей $B_\nu$ уравнением

$$B_{x\nu} = B_\nu \frac{\sqrt{2}\cdot\tau_\nu}{\pi}\sqrt{\frac{\mu\omega}{2\rho}} = \mu H_{x\nu}, \qquad (21)$$

полученным в § 11-20. Согласно [76], можно оперировать с некоторой эффективной магнитной проницаемостью на поверхности металла, которую можно определить из двух уравнений: уравнения (21) и уравнения $\mu = \frac{B}{H}$, полученного из кривой намагничивания материала. Практически наиболее правильно пользоваться опытными

* Для плоской электромагнитной волны $\frac{d^2 s}{dy^2} - j\frac{\mu\omega}{\rho}\dot{s} = 0$, откуда $\dot{s} = \dot{s}_{0m} e^{(1+j)\alpha y}$, где $\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2\rho}}$ (см. § 11-20).

значениями величины $k'_0$, которые учитывают наличие дополнительных факторов, влияющих на потери (расслоение стали, зубчатость поверхности, сопротивление лобовых частей, искажение формы кривой поля и пр.).

Уравнение (20), если в него подставить $\tau_\nu = \frac{t_1}{2}$ и $\omega_\nu = Zn2\pi$, получает вид, удобный для расчета потерь от зубцовых полей,

$$p'_0 = k'_0 (B_0 t_1)^2 \quad f_1^{1,5} \quad (Zn)^{1,5}\, k_{r\nu}^2 \ \textit{вт/см}^2. \tag{22}$$

Если подставить в выражение $k'_0$ величины $\mu = \mu_0\mu' = 0{,}4\pi \times \times 10^{-8} \cdot 2000$ и $\rho = 2 \cdot 10^{-5}$ *омсм* (для стали), то получим $k'_0 = 6290$.

При расслоенной стали сопротивление для вихревых токов увеличивается (рис. 31, *б*) и постоянная $k'_0$ уменьшается. По данным опыта [71], $k'_0$ в зависимости от толщины листа изменяется согласно табл. 6.

*Таблица 6*

**Коэффициенты для вычисления поверхностных потерь**

| Материал и толщина листов | $k_0$ | $k'_0 = 465k_0$ |
|---|---|---|
| Массивные железные наконечники или кованая сталь сплошных роторов . . . . . | 23,3 | 10 800 |
| То же, чугун . . . . . . . . . . . . . . . | 17,5 | 8 150 |
| Набранный (шихтованный) ротор, толщина листов 2 *мм* . . . . . . . . . . . . . . | 8,6 | 4 000 |
| То же, 1 *мм* . . . . . . . . . . . . . . . | 4,6 | 2 140 |
| То же, 0,55 *мм* . . . . . . . . . . . . . | 2,8 | 1 300 |
| То же, 0,5 *мм* . . . . . . . . . . . . . . | 2,5 | 1 160 |
| Легированная сталь 0,5 *мм* . . . . . . . | 1,4 | 650 |

Примечание. Данные [71] умножаются на 465 ввиду того, что у нас принята другая система единиц. Если подставить индукцию в *гс*, скорость в об/мин, шаг паза в *см*, то получим формулу [71] в *вт* на 1 *м*²

$$p'_0 = k_0 \left(\frac{Zn}{10\,000}\right)^{1,5} \left(\frac{B_0 t_1}{1000}\right)^2 k_{r\nu}^2 \ \textit{вт/м}^2. \tag{23}$$

Полные потери получатся умножением удельных потерь $p'_0$ на поверхность полюсов $S_R$. В случае синусоидального изменения индукции под полюсом рекомендуется еще умножить потери, полученные по (22) или (23), на 0,5 для учета переменного характера $B_0$ на полюсном делении (см. рис. 25).

Рифление поверхности ротора турбогенератора путем фрезерования канавок глубиной 5—6 *мм* с шагом 12—15 *мм* приводит к уменьшению поверхностных потерь вследствие возрастания сопротивления для поверхностных токов. Приближенно уменьшение потерь вследствие рифления может быть учтено путем деления коэффициента $k'_0$ на $\sqrt{\frac{u}{l}} = \sqrt{1 + \frac{2h}{t}}$, где $u$ — периметр по длине с учетом канавок; $l$ — длина ротора; $h$ — высота и $t$ — шаг канавок.



Коэффициент поверхностной реакции $k_{r\nu}$. При расчете потерь на гистерезис и вихревые токи в данном объеме употреблялись коэффициенты объемной реакции $k_{mr}$ для гистерезиса и $k_m$ для вихревых токов.

При расчете поверхностных потерь имеют место, главным образом, потери на вихревые токи *. Вихревые токи оказывают реакцию на вызывающую их индукцию, ослабляя ее величину. Коэффициент реакции $k_{r\nu}$ зависит от порядка гармонической $\nu$. На основании [87] можно сделать заключение, что при сплошной поверхности

$$k_{r\nu}^2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta\sqrt{s_\nu}}{\alpha_\nu \operatorname{tg} \alpha_\nu \sqrt{\mu'\rho'}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\sqrt{s_\nu}}{\alpha_\nu \operatorname{tg} \alpha_\nu \sqrt{\mu'\rho'}}\right)^2}, \tag{24}$$

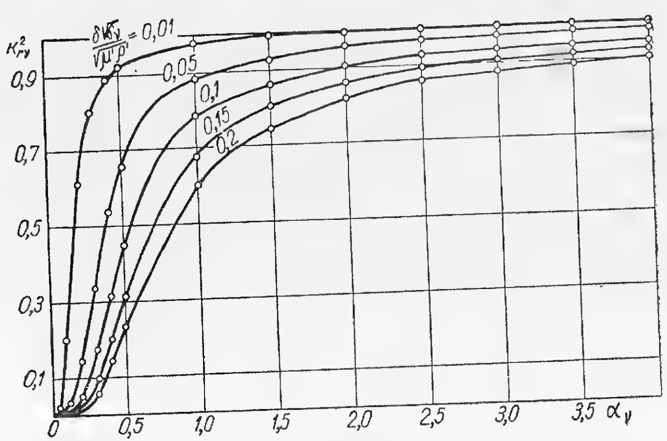



Рис. 32. Коэффициент поверхностной реакции.

где $s_\nu$ — кратность частоты в роторе, вызываемой гармоникой порядка $\nu$ статора по отношению к частоте $f_1 = 50$ *гц* [численно $s_\nu = 1 - \nu(1 - s)$, т. е. равно скольжению ротора по отношению к $\nu$-й гармонической; $\nu$ по (49) и (71) гл.4];

$$\alpha_\nu = \frac{\pi\delta}{\tau}\nu; \tag{25}$$

$s$ — скольжение ротора по отношению к основной волне;
$\delta$ — воздушный зазор, *см*;
$\tau$ — полюсное деление, *см*;

$\mu' = \frac{\mu}{\mu_0}$; $\rho' = \frac{\rho}{\rho_{Cu}}$ (см. рис. 32).

При расслоенном железе $k_{r\nu}$ получится больше, так как $\rho'$ увеличивается.

* Потери на гистерезис при расчете поверхностных потерь могут быть расчитаны по § 11-20.

Для статора асинхронной машины справедлива формула (23) при $k_0 = 2,5$ или (22) при $k'_0 = 1160$. Для учета обработки, однако, рекомендуется увеличить коэффициент $k_0$ до 4 или $k'_0$ до 1860.

Поверхностные потери на статоре (индекс «1») от зубцов ротора (индекс «2») по (23)

$$p'_{01} = 0,5k_0\left(\frac{Z_2 n}{10\,000}\right)^{1,5}\left(\frac{t_2 B_0}{1000}\right)^2 \text{ вт/м}^2. \tag{26}$$

Формулу для поверхностных потерь на роторе от зубцов статора получим при замене индексов.

Величину $B_0$ можно принять равной

$$B_0 \approx (k_C - 1)\, B_\delta. \tag{27}$$

Поверхностные потери при расслоенном железе, как правило, незначительны.

### Пульсационные потери в зубцах на холостом ходу

В машинах, имеющих пазы на статоре и роторе, кроме поверхностных потерь появляются еще «объемные» потери от пульсации в зубцах, т. е. потери, имеющие место во всем объеме зубцов. При вращении машины поток зубца изменяется благодаря изменению магнитного сопротивления. Это изменение в зубцах статора происходит с зубцовой частотой ротора $Z_2 n$ или $Z_R n$, а в зубцах ротора, наоборот, с частотой $Z_1 n$ (или $Z_s n$). Амплитуды пульсаций $B_{п1}$ и $B_{п2}$ пропорциональны средней индукции в зубцах $B_{zs}$ и $B_{zR}$. Согласно [2] и [98], амплитуды пульсации находятся через коэффициенты $\gamma$, $\sigma$, $\beta$. Более простое выражение можно получить непосредственно через коэффициент Картера.

Пульсации индукции в зубце статора зависят от колебаний магнитной проводимости на пазовом делении статора при вращении ротора. При одних положениях зубцов ротора относительно зубцов статора магнитная проводимость на пазовом делении статора будет максимальной, при других положениях она будет минимальной. Вследствие этого средняя индукция в зубцах статора будет колебаться от значения $B_{z\,\max}$ до значения $B_{z\,\min}$ с частотой $f_{z2} = Z_2 n$. Среднее значение индукции в зубцах статора будет равно

$$B_{z1} = \frac{1}{2}\left(B_{z\,\max 1} + B_{z\,\min 1}\right). \tag{28}$$

Индукция пульсаций в зубцах статора

$$B_{п1} = \frac{1}{2}\left(B_{z\,\max 1} - B_{z\,\min 1}\right). \tag{29}$$

Аналогично и для зубцов ротора.

Эти пульсации индукции в зубцах статора и ротора могут быть связаны с рассмотренными в § 3-2 пульсациями индукции в воздушном зазоре

$$\left.\begin{aligned} B_{п1} &\approx (k_{C2} - 1)\, B_\delta \frac{t_{z2} l_i}{2b_{1\,\text{ср}} l_{\text{Fe}}} \\ B_{п2} &\approx (k_{C1} - 1)\, B_\delta \frac{t_{z1} l_i}{2b_{2\,\text{ср}} l_{\text{Fe}}} \end{aligned}\right\}. \tag{30}$$



Подставляя в первое уравнение

$$B_\delta = B_{z1}\frac{b_{1\,\text{ср}} l_{\text{Fe}}}{t_{z1} l_i},$$

а во второе

$$B_\delta = B_{z2}\frac{b_{2\,\text{ср}} l_{\text{Fe}}}{t_{z1} l_i}, \tag{31}$$

получим индукции пульсаций:

$$\left.\begin{aligned} &\text{в статоре} \quad B_{п1} \approx B_{z1}\frac{1}{2}\frac{t_{z2}}{t_{z1}}(k_{C2} - 1) \\ &\text{в роторе} \quad B_{п2} \approx B_{z2}\cdot\frac{1}{2}\frac{t_{z1}}{t_{z2}}(k_{C1} - 1) \end{aligned}\right\}. \tag{32}$$

Необходимо заметить, что потери от пульсаций могут получиться особенно большими в зубцах роторов асинхронных машин при открытых пазах статора ($k_{C1}$ велико) и при малой величине пазового шага $t_{z2}$. Поэтому для снижения потерь в этих случаях берут $t_{z1} < t_{z2}$ ($Z_2 < Z_1$).

Применяя формулу (8), получим:

для статора

$$p_{п1} = \frac{1}{2}\sigma'_ф\,(\Delta Z_2 n B_{п1})^2 G_{z1} k_m; \tag{33}$$

для ротора

$$p_{п2} = \frac{1}{2}\sigma'_ф\,(\Delta\cdot Z_1 n B_{п2})^2 G_{z2} k_m, \tag{34}$$

где $\sigma'_ф \approx 1,8\,\sigma_ф$ с учетом обработки; $k_m \approx 1$.

### Добавочные потери в железе от тока нагрузки

От высших пространственных гармонических м. д. с. До сих пор мы рассматривали потери, связанные с потоком машины, т. е. потери, которые будут иметь место и при холостом ходе машины. При нагрузке возникают добавочные поля от тока (м. д. с.) статора и ротора, которые создают добавочные потери в стали от высших и зубцовых гармоник. Как известно, кривая м. д. с. якоря имеет вид ступенчатой трапеции (рис. 25, *б*). Эта кривая содержит два рода гармоник: высшие, имеющие в трехфазной машине полюсное деление $\tau_\nu = \frac{1}{\nu}\tau$, где $\nu = 5;\ 7;\ 11;\ 13\ \ldots$ при $q =$ ц. ч., и зубцовые, имеющие порядок $\nu = k\frac{Z}{p} \pm 1$, где $k = 1,\ 2,\ 3\ \ldots$ (обыкновенно учитывается только первая гармоника $k = 1$). При дробных обмотках ($q \neq$ ц. ч.) появляются низшие и дробные гармонические (§ 4-5).

Частота тока в статоре, вызываемая высшими гармониками, равна основной частоте, так как их скорость относительно статора равна $\frac{1}{\nu}$ от основной и, следовательно,

$$f_\nu = p_\nu n_\nu = \nu p_1 \frac{n_1}{\nu} = f_1.$$

Так как ротор вращается со скоростью $n_1$ в синхронной машине или $n_1(1-s)$ в асинхронной, то частота тока в роторе, вызываемая высшими гармониками, при $s = 0$ равна

$$f_{\nu R} = p_\nu(\pm n_\nu + n_1) = p_1 n_1(\pm 1 + \nu) = f_1(\nu \pm 1). \qquad (35)$$

Для обратно вращающихся гармоник 5, 11 ... надо взять знак «плюс», а для прямо вращающихся — знак «минус». Таким образом, 5-я и 7-я пространственная гармоническая статора индуктируют в роторе токи 6-кратной частоты, 11-я и 13-я — токи 12-кратной частоты и т. д. Более высокие гармонические иногда не принимаются во внимание вследствие быстрого уменьшения их амплитуды и пространственного затухания (рис. 33).

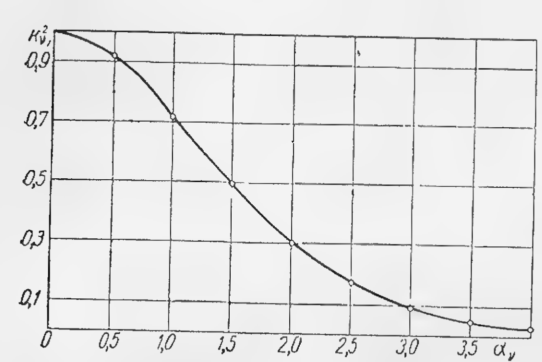



Рис. 33. Коэффициент пространственного затухания.

Гармонические м. д. с. статора, имеющие пространственный период $\tau_\nu = \frac{\tau}{\nu}$ и частоту в роторе $f_1(\nu \pm 1)$, создают поверхностные потери на поверхности ротора так же, как и рассмотренные выше гармонические потока холостого хода. По формуле (22), суммируя по всем $\nu$, получим

$$p_{\nu R} = 4\tau^2 k_0' f_1^{1,5} S_R \sum_{\nu=5,7,11\ldots} \left(\frac{1}{\nu} B_{\nu R}\right)^2 (\nu \pm 1)^{1,5} k_{r\nu}^2, \qquad (36)$$

где

$S_R$ — поверхность ротора;

$k_0'$ — по табл. 6.

Амплитуда индукции $B_{\nu R}$ на поверхности ротора без учета ослабления от реакции вихревых токов при $\delta' = \delta$ равна

$$B_{\nu R} = \mu_0 H_\nu = \mu_0 \frac{F_{\nu s}}{\delta} \cdot \frac{\pi \frac{\delta}{\tau_\nu}}{sh \frac{\pi\delta}{\tau_\nu}} = \mu_0 \frac{F_{\nu s}}{\delta'} k_\nu. \qquad (37)$$

Здесь $F_{\nu s}$ — амплитуда $\nu$-й волны м. д. с. статора, причем

$$F_{\nu s} = \frac{1}{\nu} F_1 \frac{k_{w\nu}}{k_w}, \qquad (38)$$

где $F_1$ — амплитуда м. д. с. основной волны.

Коэффициент пространственного затухания волны

$$k_\nu = \frac{B_\nu(y=\delta)}{B_\nu(y=0)} = \frac{\pi \frac{\delta}{\tau_\nu}}{sh \frac{\pi\delta}{\tau_\nu}} \qquad (39)$$



и представляет собой отношение действительного максимального значения нормальной составляющей индукции на поверхности ротора к тому значению, которое было бы при бесконечно малом зазоре.

Коэффициент $k_\nu$ относится только к гармоникам, создаваемым током якоря. Гармоники, создаваемые на *холостом ходу* от зубчатости якоря, не должны умножаться на $k_\nu$, так как ослабление индукции здесь учитывается коэффициентом Картера.

Таким образом, вводятся два коэффициента $k_\nu$ и $k_{r\nu}$. Последний учитывает ослабление поля от обратного действия вихревых токов.

Если подставить $F_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} A\tau k_w$ в формулы (38) и (36), то получим, вводя для общности коэффициенты ослабления $k_{r\nu}$ и гистерезиса $a_\Gamma = 1,4$,

$$p_{\nu R} = \frac{8}{\pi^2} a_\Gamma \frac{\tau^4}{\delta^2} k_0' \mu_0^2 A^2 f^{1,5} S_R \sum_{\nu=5,7,11\ldots} (\nu \pm 1)^{1,5} \left(\frac{1}{\nu^2} k_{w\nu}\right)^2 k_{r\nu}^2 k_\nu^2 =$$

$$= 1,4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} \frac{A^2\tau^4}{\delta^2 \sqrt{\mu'\rho'}} \varphi(y). \qquad (40)$$

Для стали: $\mu' = 1000$; $\rho' = \frac{\rho}{\rho_{Cu}} = 10$; $\sqrt{\mu'\rho'} \approx 100$. Согласно (40) можно прийти к неверному выводу, что с уменьшением $\sqrt{\mu'\rho'}$ потери увеличиваются. В действительности при малом значении $\sqrt{\mu'\rho'}$ (например, равном единице для меди) еще более уменьшается $k_{r\nu}^2$, и потери уменьшаются.

На рис. 34 представлены кривые

$$\varphi(y) = \sum \frac{k_{w\nu}^2}{\nu^4} (\nu \pm 1)^{1,5} \cdot k_{r\nu}^2 \cdot k_\nu^2 \qquad (41)$$

и $\varphi_1(y) = \varphi(y)$ при $k_\nu^2 = k_{r\nu}^2 = 1$ в функции шага обмотки $y$.

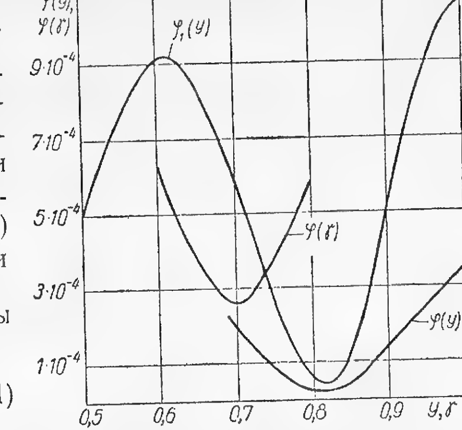



Рис. 34. Кривые $\varphi(y)$ и $\varphi(\gamma)$ для расчета поверхностных потерь:
$\varphi_1(y)$ — без учета затухания,
$\varphi(y)$ — с учетом затухания.

В отдельных случаях необходимо вычислить $k_\nu$ и $k_{r\nu}$, так как в противном случае может получиться весьма преувеличенное значение потерь.

Из формулы (40) наглядно видна зависимость $p_{\nu R}$ от линейной нагрузки, полюсной дуги и зазора. При больших полюсных делениях и линейных нагрузках (турбогенераторы), при недостаточных величинах зазоров $\delta$ и при отклонениях шага обмотки от $y = 0,8$ могут возникать весьма большие потери на поверхности ротора. Известны отдельные неблагоприятные случаи, когда ротор нагревался от этих потерь до цветов побежалости [2]. Из рис. 34 видно, что при $y = 1$ $\varphi_1(y)$ в 28 раз больше, чем при $y = 0,83$.

**От зубцовых полей статора на поверхности ротора.** Формула (40) может быть применена для расчета потерь на поверхности ротора от зубцовых гармоник.

Пространственный порядок этих гармоник по отношению к основной волне равен

$$\nu_1 = \left(1 \pm k\frac{Z_1}{p}\right), \tag{42}$$

где $k = 1, 2, 3$ и т. д.

Знак «+» — для прямобегущих волн, знак «—» — для обратнобегущих волн.

Кратность частоты, вызываемая в роторе,

$$\nu = k\frac{Z_1}{p}. \tag{43}$$

Полюсное деление этих гармоник

$$\tau_\nu = \frac{\tau p}{kZ_1} = \frac{t_1}{2}\frac{1}{k}, \tag{44}$$

где $t_1$ — шаг паза.

Подставляя (20а), (43), (44) в (40), получаем

$$p_{\nu zR} = \frac{2\mu_0^2 A^2 t_1^4 f_1^{1,5} k_w^2 \left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5} S_R a_г}{8\pi^2\sqrt{\pi\mu_0\rho_{Cu}}\,\delta^2\sqrt{\mu'\rho'}}\sum_k \frac{k_{r\nu}^2 k_\nu^2}{\nu^{2,5}} \approx$$

$$\approx 1,4 \cdot 1,14 \cdot 10^{-8}\frac{A^2 t_1^4 k_w^2\left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5} k_э^2}{\delta^2\sqrt{\mu'\rho'}} S_R. \tag{45}$$

Здесь

$$k_э^2 \approx \left(\frac{\alpha_\nu}{sh\alpha_\nu}\right)^2; \quad \alpha_\nu = \frac{\pi\delta}{\tau}\cdot\frac{Z_1}{p}.$$

Из формулы (45) можно видеть, что при большой величине зубцового деления $t_1$ и малом зазоре $\delta$ потери могут сильно возрасти.

**От высших гармонических зубчатого ротора на поверхности статора (турбогенераторы).** Кривая поля ротора так же, как и кривая поля статора, содержит высшие и зубцовые пространственные гармонические. Если ротор питается постоянным током (синхронные машины), то эти гармонические неподвижны относительно ротора, имеют пространственное полюсное деление $\tau_\nu = \frac{\tau}{\nu}$ и, следовательно, индуктируют в статоре токи частоты

$$f_\nu = p_\nu n_\nu = \nu p_1 n_1 = \nu f_1.$$

Амплитуда высшей гармонической индукции найдется аналогично формуле (37). При однофазных обмотках ротора:

$$F_{1R} = \frac{4}{\pi}A_R\frac{\tau}{2}k_{w1}\cdot\gamma;$$

$$F_{\nu R} = F_{1R}\frac{1}{\nu}\cdot\frac{k_{w\nu}}{k_{w1}}; \quad k_{w\nu} = \frac{\sin\nu\frac{\pi}{2}\gamma}{\nu\frac{\pi}{2}\gamma};$$

$$\gamma = \frac{Z_R}{N_R} = \frac{\tau - b}{\tau} \text{ (рис. 18).} \tag{46}$$



Линейная нагрузка ротора $A_R = \frac{i_f s_п}{t_2}$, где $i_f s_п$ — объем тока на паз, $t_2 = t_R$.

Аналогично (37) получаем при $\delta' = \delta$

$$B_{\nu s} = \mu_0 H_{\nu s} = \mu_0\frac{F_{\nu R}}{\delta}k_{\nu 2}; \quad k_{\nu 2} = \frac{\pi\nu\delta}{\tau \operatorname{sh}\frac{\pi\nu\delta}{\tau}}. \tag{47}$$

Потери аналогично (36) с добавлением $\nu = 3$ будут

$$p_{\nu s} = 4\gamma^2\tau^2 k_0' f_1^{1,5} S_s \sum_{\nu=3,5,7\ldots}\left(\frac{1}{\nu}B_{\nu s}\right)^2 \nu^{1,5} k_{r\nu} \tag{48}$$

или, подставляя $B_{\nu s}$ и преобразовывая, получим

$$p_{\nu s} = 4\gamma^2\frac{\tau^4}{\delta^2}k_0'\mu_0^2\left(\frac{2}{\pi}A_R\right)^2 f_1^{1,5} S_s \sum_{\nu=3,5,7\ldots}\frac{k_{w\nu}^2}{\nu^{2,5}}k_{\nu 2}^2 k_{r\nu}^2 =$$

$$= 1,4\cdot 0,6\gamma^2\cdot 10^{-10}\left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} S_s\frac{A_R^2\tau^4}{\delta^2}\varphi(\gamma), \tag{49}$$

где $\varphi(\gamma) = \sum_{\nu=3,5,7\ldots}\frac{k_{w\nu}^2}{\nu^{2,5}}k_{\nu 2}^2 k_{r\nu}^2$ в функции отношения $\gamma$ представлена на рис. 34 при $k_{\nu 2}^2 k_{r\nu}^2 = 1$.

Необходимо иметь в виду, что здесь величина $k_0'$ должна быть взята для листовой легированной стали, т. е. $1,4\cdot 465 = 650$, в то время как для сплошного ротора $k_0' = 23,3\cdot 465$, т. е. при том же процентном содержании гармонических в кривой поля ротора, что и в кривой поля статора, потери на статоре будут меньше в отношении $\frac{k'_{ост}}{k'_{0рот}} = \frac{1,4}{23,5}$, т. е. почти в 17 раз.

Для расслоенного статора можно пренебречь экранированием и положить $k_{r\nu}^2 = 1$.

В формуле (49) коэффициент 1,4 также учитывает потери на гистерезис.

**От зубцовых полей ротора на поверхности статора.** Эти потери определяются аналогично таковым на поверхности ротора; необходимо только вычислить соответствующие индукции и частоты (рис. 18)

$$p_{\nu zs} = 0,5k_0' S_s (B_{\nu zs} t_2)^2\left(\frac{N_R}{p}f_1\right)^{1,5}, \tag{50}$$

где $B_{\nu zs}$ — амплитуда зубцовой гармоники ротора на поверхности статора.

Выражая индукцию зубцовых пульсаций через среднюю линейную нагрузку ротора $A_R$, получим

$$B_{\nu zs} = \sqrt{2}\mu_0\frac{A_R t_2}{2\delta}k_{\nu 2}. \tag{51}$$

После подстановки в (50) получим

$$p_{\nu zs} = 0{,}25\,\frac{k_0'}{2} S_s \mu_0^2 A_R^2 \frac{t_2^4}{\delta^2} \cdot k_{r\nu}^2 k_{\nu 2}^2 a_\Gamma =$$

$$= 0{,}06 \cdot 10^{-10} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} \frac{A_R^2 t_2^4 \left(\frac{N_R}{p}\right)^{1,5} k_{\nu 2}^2}{\delta^2} S_s \text{ вт}, \qquad (52)$$

где $k_{\nu 2}^2 = \left(\frac{\alpha_\nu}{sh\alpha_\nu}\right)^2$; $\alpha_\nu = 2\pi \frac{\delta}{t_{R1}}$ (рис. 33); $a_\Gamma \approx 1{,}4$.

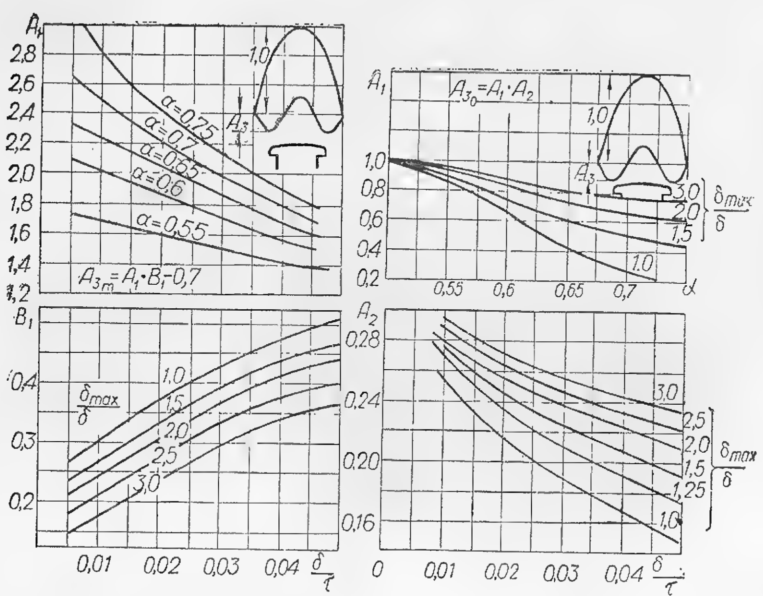



Рис. 35. Определение 3-й гармонической в явнополюсных машинах.

Эта величина, как видно, меньше, чем соответствующая величина на роторе $p_{\nu zR}$.

В формуле (52) взято $\frac{k_0'}{2}$, так как в области большого зуба турбогенератора $B_{\nu zs} = 0$; $k_{r\nu}^2 \approx 1$, $k_0' = 650$ по табл. 6.

От 3-й гармонической в зубцах статора в явнополюсных синхронных машинах. При номинальном токе имеет место третья гармоническая поля, увеличивающая потери в зубцах. Амплитуду третьей гармонической можно определить по методу [102] в виде

$$B_3 = B_{z2}[A_{3m} x_d + 1{,}27 x_{ad} A_{30}] \approx 0{,}16 x_d B_{zs}. \qquad (53)$$

Коэффициенты $A_{3m}$ и $A_{30}$ находим по рис. 35; $x_d$ и $x_{ad}$ — синхронная реактивность и реактивность взаимоиндукции по продольной оси;

$$B_{z2} = B_{zs} = B_{zcp}.$$



Потери от 3-й гармонической

$$p_{z3} = 10{,}7 p_{10}' \left(\frac{B_3}{10\,000}\right)^{5/4} G_2 \text{ вт},$$

где $p_{10}$ — по табл. 5.

По другой формуле [см. (3) и (15)].

$$p_{z3} = \left[k_z p_{10} B_3^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} + 50a' B_3 \frac{f}{50}\right] G_z, \qquad (55)$$

где $B$ в вб/м², $k_z \approx 2$, $f = 150$ гц.

Пульсационные потери в зубцах статора от зубцовых полей ротора. Кроме потерь в зубцах от пульсаций потока, имеют место также объемные пульсации в зубцах от гармонических, связанных с величиной тока в пазах (рис. 25,б), т. е. от полей зубцового рассеяния. Расчет этих потерь для зубцов статора может быть произведен по формуле (33), где в качестве индукции $B_п$ следует подставить величину $B_{\nu zs}$ по формуле (51). Приближенный учет влияния ширины зубца статора может быть сделан умножением $B_{\nu zs}$ на коэффициент $\frac{t_2}{\pi b_{z12}}$*, который обычно близок к единице.

Для зубцов ротора, изготовленного из расслоенной стали, применяется формула (34), где вместо $B_{п2}$ подставляется $B_{\nu zR}$ по (37), умноженная на $\frac{t_1}{\pi b_{z22}}$.

Если ротор сделан цельнокованым, то объемные потери от пульсаций в зубцах ротора не имеют места, а существуют только поверхностные потери.

Формулы для суммарных пульсационных потерь приводятся в примере расчета турбогенератора.

Потери в нажимных плитах статора. Поле рассеяния лобовых частей, изменяющееся с частотой тока, индуктирует вихревые токи во всех металлических частях, окружающих лобовые части, в особенности в наиболее близко расположенных нажимных плитах. Расчет этих потерь весьма затруднителен из-за сложности характера поля. На основании опытных данных эти потери приближенно можно оценить формулой

$$p_{пл} = \frac{k}{a^{2/3}} \pi (D + 0{,}25\tau) F_1^2 \text{ вт}, \qquad (55а)$$

где $a \approx 0{,}25\tau \cdot y$ — расстояние «центра тяжести токов» от плиты, см;

$F_1$ — м. д. с. статора на полюс.

Постоянная $k$ пропорциональна $\sqrt{\mu\rho}$; для магнитных плит (литая сталь) $k \approx 9{,}5 \cdot 10^{-7}$, для чугуна $k \approx 2{,}8 \cdot 10^{-7}$. Для немагнит-

* Здесь принимается во внимание 1-я зубцовая гармоника ротора, поток которой равен $\frac{2}{\pi} B_{\nu zs} \frac{t_2}{2}$. Считая, что этот поток замыкается через зубец статора, получим индукцию $B_{\nu zs} \frac{t_2}{\pi b_{z12}}$.

ного чугуна и стали, обычно применяемых для современных турбогенераторов, величина $k$ может быть принята порядка 10—20% от последней цифры. Исследования этих потерь относятся к важным задачам, особенно для сверхмощных турбогенераторов.

## 5-3. ПОТЕРИ В МЕДИ ОБМОТОК

Основные потери в якоре

$$p_{Cu\,осн} = mI^2r, \tag{56}$$

где $m$ — число фаз;

$$r = \rho l_w \cdot \frac{w}{q_ф}, \tag{57}$$

$r$ — обычно приводится к 75°C по формулам

$$r_\theta = r_{\theta 1}[1 + \alpha_1(\theta - \theta_1)];\quad \alpha_1 = \frac{1}{235 + \theta_1};$$

$$\rho_{75} = \rho_{20}\left[1 + \frac{75 - 20}{235 + 20}\right] = 1{,}213\rho_{20}. \tag{58}$$

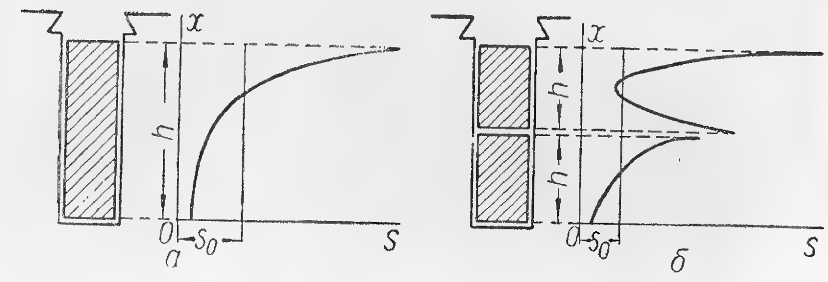



Рис. 36. Вытеснение тока в пазу:
*а* — при одном проводнике; *б* — при двух проводниках.

Для меди

$\gamma_{Cu} = 8{,}89 \cdot 10^{-3}$ *кг/см³*; $\rho_{20} = 0{,}01784$ *ом · мм²/м*, или $1{,}784 \times 10^{-6}$ *омсм*; $\rho_{75} = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *омсм*.

Для алюминия

$$\rho_{20} = 0{,}034;\quad \gamma = 2{,}7 \cdot 10^{-3}\ кг/см^3.$$

Добавочные потери в меди якоря при синусоидальном токе. Как известно, при переменном токе в массиве проводников, кроме рабочих токов, протекают вихревые токи, налагающиеся на рабочие и вызывающие эффект так называемого вытеснения тока. Потери на вихревые токи в меди проводников и представляют добавочные потери в меди. Появление дополнительных потерь обыкновенно учитывается коэффициентом возрастания сопротивления

$$k_r = \frac{r}{r_0} = \frac{\text{сопротивление переменному току}}{\text{сопротивление постоянному току}}.$$

Действительно, наложение вихревых токов на рабочие токи приводит к тому, что сечение проводника обтекается током неравномерно (рис. 36), при этом полезное сечение проводника уменьшается, а его эквивалентное сопротивление возрастает.



Кроме вихревых токов, в массиве проводников при определенных условиях появляются циркуляционные токи между параллельно соединенными контурами, находящимися в различных магнитных условиях и обладающими различным индуктивным сопротивлением. Для избежания циркуляционных токов обмотки подвергают транспозиции таким образом, чтобы все параллельные кон-

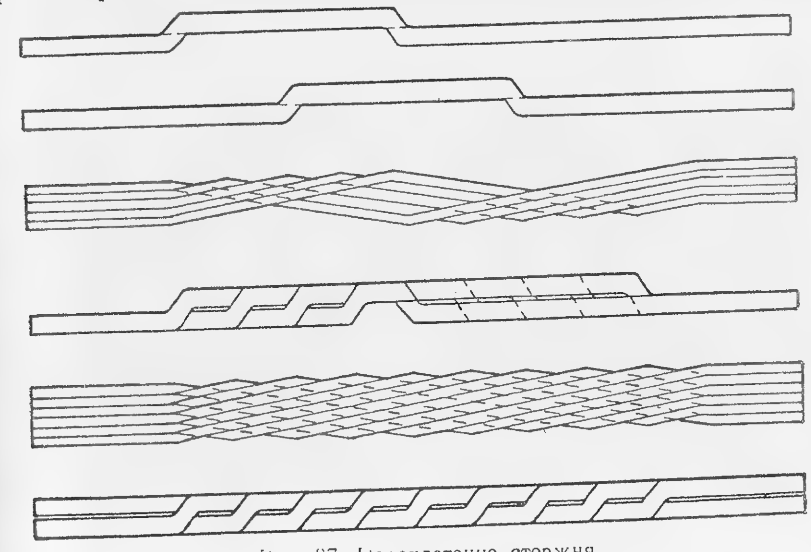


Рис. 37. Переплетение стержня.

туры обмотки находились бы по возможности в одинаковых магнитных условиях. На рис. 37 показана транспозиция отдельных проводников массивного стержня синхронной машины большой мощности [2].

Рассмотрим сначала дополнительные потери от вихревых токов, в общем случае для паза с $m$ проводниками по высоте и $n$ проводниками по ширине (рис. 38). *

Рассматривая $p$-й проводник [98], находим, что коэффициент увеличения сопротивления равен

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + \frac{I_\sigma(I_\sigma + I_p)}{I_p^2}\psi(\xi), \tag{59}$$

Рис. 38. Расположение проводников в пазу.

где $I_p$ — ток в $p$-ом проводнике;

$I_\sigma$ — сумма токов всех проводников, лежащих ниже $p$-го.

Если, как обычно, по всем $(p-1)$ нижним проводникам течет одинаковый ток, то

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + (p^2 - p)\psi(\xi). \tag{60}$$

* Случай проводников с внутренними каналами охлаждения рассмотрен в гл. 12.

9*

Здесь $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ — функции *приведенной высоты проводника*:

$$\xi = \alpha h; \quad \alpha = \sqrt{\frac{b_{Cu}}{b_п} \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\rho} \frac{1}{см}}; \tag{61}$$

$h$ — действительная высота проводника.

Понятие приведенной высоты является весьма важным. При $\omega = 2\pi f = 314$, $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$ *омсм*, $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$ *гн/см*, $\sqrt{\frac{b_{Cu}}{b_п}} \approx 1$ получим $\alpha \approx 1$, т. е. в этом случае приведенная высота численно равна высоте проводника в *см*. Так как $\alpha$ имеет размерность, обратную длине, то $\xi$ — величина безразмерная. Как видно, она характеризует влияние на вихревые токи магнитной проницаемости, частоты, удельного сопротивления и действительной высоты проводника. Функции $\varphi$ и $\psi$ приведены на рис. 39. Первая численно равна коэффициенту $k_r$ одного проводника, а другая характеризует взаимное влияние проводников

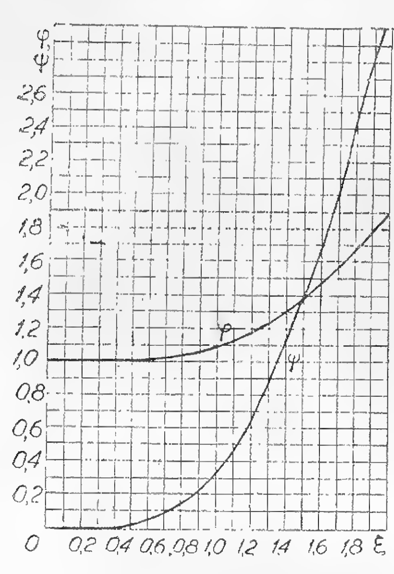



Рис. 39. Кривые $\varphi = f(\xi)$ и $\psi = f(\xi)$.

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{sh 2\xi + \sin 2\xi}{ch 2\xi - \cos 2\xi};$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{sh \xi - \sin \xi}{ch \xi + \cos \xi}.$$

В пределах $0 < \xi < 1$ можно считать

$$\varphi(\xi) = 1 + \frac{4}{45}\xi^4 \text{ и } \varphi(\xi) = \frac{1}{3}\xi^4.$$

При $\xi > 2$

$$\varphi(\xi) = \xi \text{ и } \psi(\xi) = 2\xi. \tag{62}$$

Замечательным является одно из следствий формулы (60) и равенств (62), а именно: не всякое подразделение приводит к уменьшению потерь, как это может показаться с первого взгляда. Согласно [98], один проводник высотой 6 *см*, уложенный в паз, дает при $f = 50$ *гц* увеличение сопротивления $k_r = 5{,}4$, т. е. в 5,4 раза больше, чем сопротивление постоянному току. Два проводника по 3 *см* дают средний коэффициент $k_r = 8{,}4$; три проводника по 2 *см* дают $k_r = 8{,}2$ и только подразделение на двенадцать проводников по 0,5 *см* дает $k_r \approx 3$.

Для получения допустимых потерь на вихревые токи желательно при $f = 50$ *гц* высоту отдельного проводника брать меньше 0,5 *см* в особенности при больших $m$. В машинах постоянного тока иногда применяют большие высоты при частотах в якоре меньше 50 *гц* для удобства технического выполнения обмотки. Коэффициент $k_r$ получается здесь в допустимых пределах, так как $m = 2$.



Среднее значение коэффициента $k_r$ для всех $m$ проводов, лежащих по высоте, равно

$$k_r = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3}\psi(\xi). \tag{63}$$

В *лобовой части* в случае непрерывной обмотки коэффициент увеличения $k_л$ обыкновенно намного меньше, чем в пазовой. Поэтому при сильно подразделенной и переплетенной меди иногда полагают величину $k_{rл}$ в лобовых частях равной единице. В отдельных случаях, однако, при массивных лобовых соединениях этот коэффициент может быть значительным и требует определения. Так, имеются случаи турбогенераторов старых конструкций,

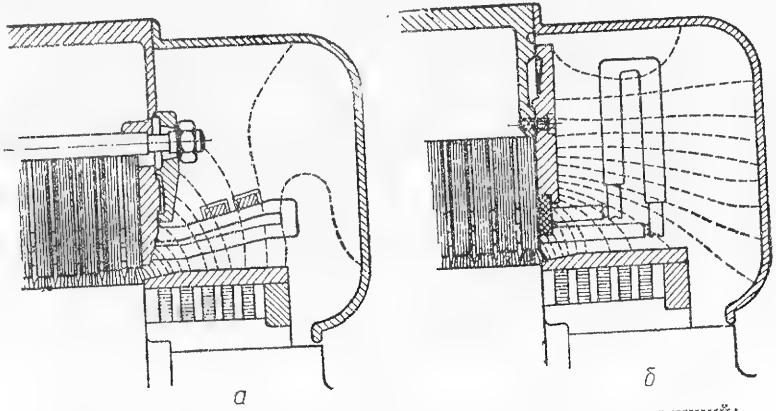



Рис. 40. Поле рассеяния лобовых частей различных конструкций:
*а* — корзиночная обмотка; *б* — эвольвентная обмотка.

у которых лобовые соединения делались в виде массивных «вилок» из шинной меди, приклепанных и припаянных к стержням паза. В этих случаях коэффициент $k_{rл}$ доходил до 5 и выше, т. е. добавочные потери были в 4 раза больше основных.

Расчет $k_r$ в лобовых частях можно свести к случаю паза. На рис. 40 показаны разрезы лобовых частей. Рассматривая эти разрезы, можно прийти к выводу, что лобовые части представляют как бы один эквивалентный большой паз. Для пучка проводов, расположенных в свободном пространстве, этот эквивалентный паз показан на рис. 41,*б*; ширина этого «паза» по [98] равна

$$b_п = B + 1{,}2H. \tag{64}$$

В других случаях эквивалентную ширину паза можно определить из чертежа, считая за стенки паза нажимную плиту и щит (рис. 40). В остальном расчет ведется по формуле (63).

Средний коэффициент возрастания сопротивления $k_r$ всей обмотки, очевидно, будет равен

$$k_r = \frac{k_{rп} l + k_{rл} l_л}{l + l_л} \approx \frac{k_{rп} + l_л/l}{1 + l_л/l}. \tag{65}$$

Добавочные потери в меди с учетом потерь от циркуляционных токов между параллельными проводниками одного витка при отсутствии их транспозиции

$$p_{\text{Cu доб}} = p_{\text{Cu осн}}\left[(k_r - 1) + (k_{rc} - 1)\right], \qquad (66)$$

где $k_r$ — коэффициент возрастания сопротивления от вихревых токов для переплетенных проводников, по (65);

$k_{rc}$ — коэффициент увеличения потерь от циркуляционных токов вычисляется по (63), (65), если вместо $\xi$ подставить $\xi' = \alpha h'$; где $h'$ —

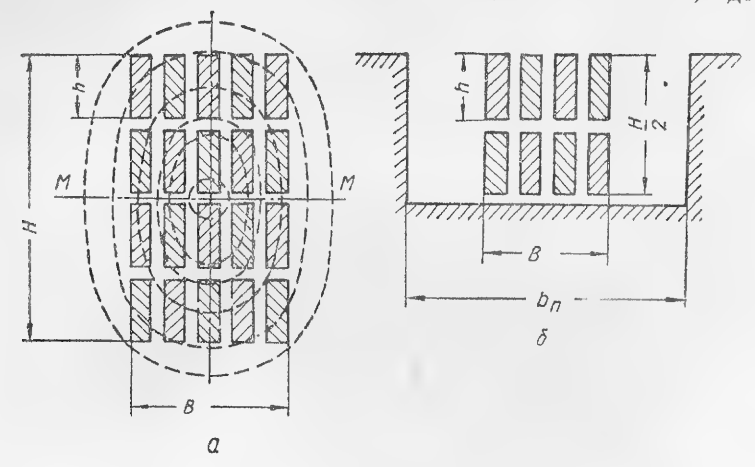



Рис. 41. Определение $k_r$:

*а* — для пучка проводников в воздухе; *б* — для эквивалентного паза.

общая высота непереплетенных проводников одного витка, а вместо $m$ подставить число витков, лежащих в пазу друг над другом;

$$k_{rc} = 1 \text{ — для плетеных стержней.}$$

Коэффициент сопротивления в машинах постоянного тока. Проводники якоря постоянного тока обтекаются переменным током трапецоидальной формы (рис. 42). Уклон трапеции соответствует периоду коммутации $T_к$. Так как период коммутации составляет ничтожную долю полупериода тока $T_1$, то можно считать трапецию прямоугольником. Разложение прямоугольника в ряд дает уравнение тока в виде

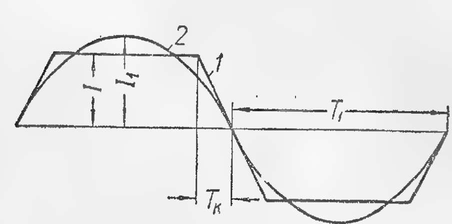



Рис. 42. Формы кривой тока в проводнике якоря:

*1* — действительная форма; *2* — основная гармоническая.

$$f(t) = \frac{4}{\pi} I\left[\sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \ldots\right]. \qquad (67)$$



Для каждого из синусоидальных токов выражение $k_r$ известно по уравнению (63), если подставить соответствующую частоту.

Общие потери от вихревых токов будут равны сумме потерь от всех гармоник

$$p_{\text{Cu доб}} = r\sum_{\nu=1}^{\infty}(k_{r\nu} - 1)\, I_\nu^2$$

или

$$k_r = 1 + \Sigma(k_{r\nu} - 1)\left(\frac{I_\nu}{I}\right)^2. \qquad (68)$$

В результате суммирования найдено

$$k_r = 1 + \frac{4}{3\pi} m^2\xi^2,$$

где $\xi$ вычисляется для основной частоты по (61)

$$\xi \approx 0{,}15h\sqrt{f}.$$

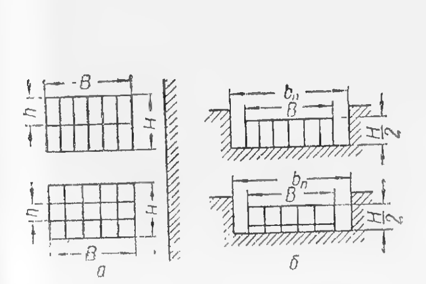



Рис. 43. Определение $k_r$ для трансформатора с дисковой обмоткой:

*а* — расположение обмоток; *б* — приведение к эквивалентному пазу.

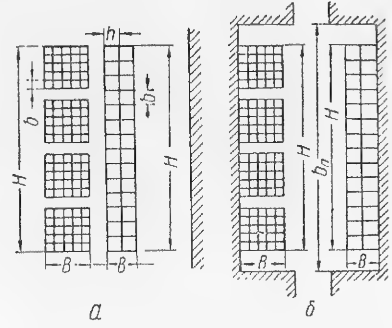



Рис. 44 Определение $k_r$ для трансформатора с цилиндрической обмоткой:

*а* — расположение обмоток; *б* — приведение к эквивалентному пазу.

Для всей обмотки, считая $k_r$ лобовой части равным единице,

$$k_r = 1 + \frac{4}{3\pi} m^2\xi^2 \frac{l}{l + l_л}. \qquad (69)$$

Учет конечного периода коммутации необходим в случае больших величин $\xi$ (больших добавочных потерь). Согласно [98] этот учет производится с помощью умножения второго слагаемого формулы (69) на коэффициент

$$F = \frac{0{,}116T_1\xi^2}{0{,}13T_1\xi^2 + T_к}. \qquad (70)$$

Приближенно

$$k_r \approx 1 + 0{,}07\frac{l}{l + l_л}\sqrt{\frac{\tau}{b_{к.з}}}\, m^2\xi^3, \qquad (71)$$

где $b_{к.з}$ — ширина коммутационной зоны.

Коэффициент сопротивления в трансформаторах. Нахождение $k_r$ для трансформаторных обмоток можно свести к случаю лобовой части машины в воздухе (рис. 41). Расположение трансформаторных обмоток представлено на рис. 43 для дисковой обмотки и на рис. 44 для цилиндрической обмотки.

Для дисковой чередующейся обмотки линии рассеяния проходят, главным образом, в радиальном направлении. Применяя уравнение (63), следует вместо $m$ брать $\frac{m}{2}$, как это видно из рис. 43. Тогда уравнения (62) и (63) дают

$$k_r \approx 1 + \frac{m^2-1}{3}\psi(\xi) = 1 + \frac{m^2-0{,}8}{36}\xi^4. \tag{72}$$

При круглых проводниках

$$k_{r\varnothing} = 1 + \frac{m^2-0{,}8}{61}\xi. \tag{73}$$

Для цилиндрической обмотки (рис. 44) линии рассеяния проходят, главным образом, в осевом направлении и эквивалентный паз будет иметь вид, представленный на рис.44, *б*. Здесь, очевидно, будет

$$k_r = 1 + \frac{m^2-0{,}2}{9}\xi^4 \quad \text{и} \quad k_{r\varnothing} = 1 + \frac{m^2-0{,}2}{15{,}25}\xi^4, \tag{74}$$

где по (61)

$$\xi = \alpha h; \quad \alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2\rho}\cdot\frac{H_{Cu}}{Hk_R}} \approx \sqrt{\frac{H_{Cu}}{H}k_R}; \tag{75}$$

$k_R$ — коэффициент Роговского (гл. 9);
$H_{Cu}$ — общая высота чистой меди.

### 5-4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ (ПОТЕРИ НА ТРЕНИЕ В ПОДШИПНИКАХ И НА ВЕНТИЛЯЦИЮ)

**Потери на трение в подшипниках скольжения горизонтальных машин** в широком диапазоне пропорциональны окружной скорости на цапфе в степени 1,5, площади проекции цапфы и коэффициенту трения, зависящему от вязкости масла и температуры. При температуре 16 ÷ 50°C потери на трение обратно пропорциональны температуре масла. Так, для крупных быстроходных машин потери на трение в подшипниках скольжения можно считать по формуле [98]

$$p_т = 2{,}3 l_ц \frac{50}{\theta^0}\sqrt{\lambda_{50} p_ц d_ц\left(1 + 4\frac{d_ц}{l_ц}\right)} v_ц^{1,5}, \tag{76}$$

где $l_ц$ и $d_ц$ — диаметр и длина цапфы, *см*;
$p_ц$ — удельное давление, *кг/см²*;
$v_ц$ — окружная скорость, *м/сек*;
$\lambda_{50}$ — вязкость масла при 50°C (в пределах от 0,0015 до 0,002 *сек кг/м²*).

Для шариковых подшипников

$$p_т = 0{,}015\frac{G}{D_{ц.ш}} v_ц\, вт, \tag{77}$$

где $G$ — нагрузка кольца, *кг*;
$D_{ц.ш}$ — диаметр окружности центров шариков;
$v_ц$ — окружная скорость на цапфе, *м/сек*.



Для малых машин с кольцевой смазкой

$$p_т = \frac{26}{\theta^0} d_ц l_ц v_ц^{1,5} вт. \tag{78}$$

По данным [1] наивыгоднейшая работа подшипника протекает при относительном эксцентриситете $\chi = 0{,}5$ (рис. 45, *в*). При этом получается минимальный коэффициент трения

$$\mu = \sqrt{2\frac{\lambda\omega}{p_ц}}, \tag{79}$$

где $p_ц$ — удельное давление, *кг/м²*;
$\lambda$ — вязкость масла по рис. 46.

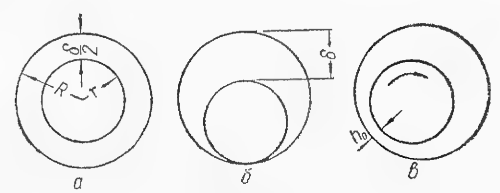



Рис. 45. Относительный эксцентриситет:
$а - \chi = \frac{e}{R-r} = \frac{2e}{\delta} = 0$; $б - \chi = 1$; $в - \chi = \frac{0{,}5\delta - h_0}{0{,}5\delta}$.

Потери на трение в подшипниках, согласно общему закону потерь на трение, будут

$$p_т = 9{,}81 G v_ц \mu, \tag{78а}$$

где $G$ — вертикальная нагрузка, *кг*.

**Потери в подшипниках вертикальных машин**

$$p_т = 9{,}81 G v \mu, \tag{78б}$$

где $\mu$ — коэффициент трения (рис. 47);
$G$ — нагрузка на подпятник, *кг*;
$v$ — расчетная скорость по диаметру $D_т$*;

$$D_т = D_1 + 2\cdot 0{,}7B,$$
$$v = \pi D_т n \ м/сек,$$

$D_1$ — внутренний диаметр;
$B$ — ширина сегмента.

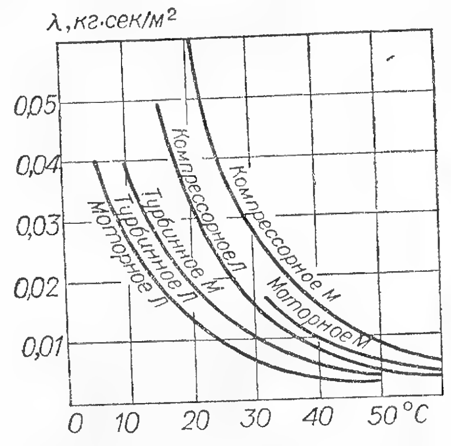



Рис. 46. Вязкость масла в зависимости от температуры.

Согласно данным завода «Электросила», потери на трение в подпятниках определяются также по кривым рис. 48.

* Размеры среднего диаметра трения можно взять ориентировочно из чертежей близких по типу машин.

На кривых указаны цифры суммарного давления на подпятник; по оси абсцисс получаются потери на трение в зависимости от скорости вращения.

Подробнее о расчете подшипников и подпятников см. [1], [154], а также § 8-8.

**Вентиляционные потери.** Вентиляционные потери в машинах состоят из потерь в вентиляторе и вентиляционной системе — $p_{v1}$ и потерь на трение ротора о воздух — $p_{v2}$.

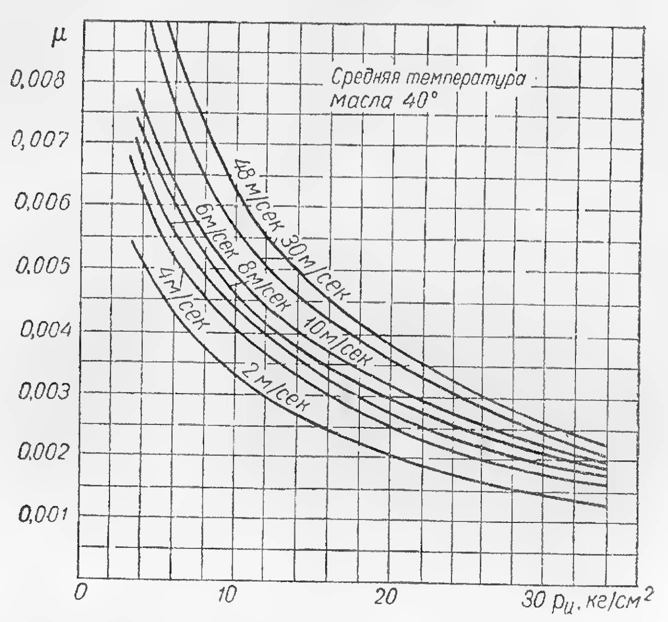



Рис. 47. Коэффициент трения пружинных подпятников.

Как известно, полная мощность с учетом потерь вентилятора, расходуемая на перемещение $V$ м³/сек воздуха при напоре $H$ мм вод. ст., равна

$$p_{v1} = 9{,}81\frac{VH}{\eta} = 9{,}81VH_t = 9{,}81V\frac{v_2^2 - v_1^2}{g}\gamma_a \approx 1{,}1V(v_2^2 - v_1^2)\ \textit{вт}, \qquad (80)$$

где

$H$ — полезный напор вентилятора, кг/м²;
$H_t$ — теоретический напор вентилятора;
$v_2$ — окружная скорость по максимальному диаметру вентилятора, м/сек;
$v_1$ — то же, по минимальному диаметру;
$\gamma_a$ — удельный вес воздуха, кг/м³.

Расход воздуха $V$ определяется суммой потерь, уносимых воздухом $\Sigma' p$, и повышением температуры воздуха $\Delta\theta_a$ °C

$$V = \frac{\Sigma' p\ (\textit{квт})}{1{,}1\Delta\theta_a}\ \textit{м}^3/\textit{сек}; \quad \Sigma' p \approx \Sigma p. \qquad (81)$$



Потери на трение ротора о воздух согласно данным опыта:

а) для явнополюсных машин (формула, применяемая заводами)

$$p_{v2} = 0{,}018\frac{n}{1000}\left(\frac{v}{10}\right)^2\frac{l_r + l_v}{10}\cdot\frac{h_m D}{1000} + 0{,}416\left(\frac{v'_r}{10}\right)^3\ \textit{квт}, \qquad (82)$$

где $n$ — скорость вращения, об/мин;
$v$ — окружная скорость ротора, м/сек;
$l_r + l_v$ — длина ротора плюс длина вентилятора, см;
$h_m$ и $D$ — высота полюсов и диаметр расточки, см;
$v'_r$ — окружная скорость по окружности обода, м/сек.

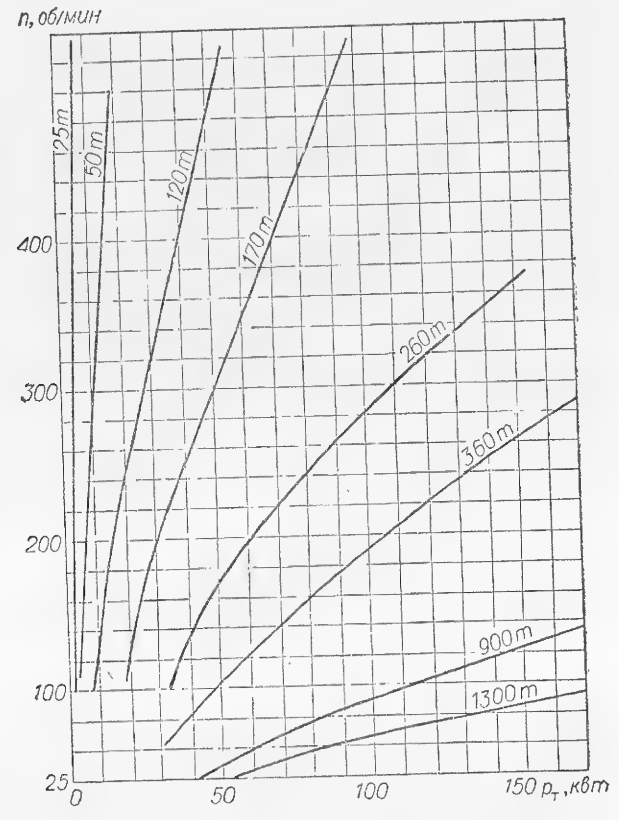



Рис. 48. Потери в подпятниках при различных нагрузках и скоростях вращения.

Более простая универсальная формула

$$p_{v2} = c\omega^3 D_R^5\left(1 + 5\frac{l_R}{D_R}\right)\ \textit{квт}, \qquad (83)$$

где $D_R$ — диаметр ротора, м;
$l_R$ — длина ротора;

$$\omega = \frac{2\pi n\ (\text{об/мин})}{60};$$

$c$ — постоянная, зависящая от «шероховатости» ротора и плотности охлаждающего газа. Для воздушного охлаждения в гидрогенераторах разных конструкций постоянная $c = (1{,}5 - 3) \cdot 10^{-6}$;

б) для неявнополюсных машин, $n = 3000$ об/мин, при воздушном охлаждении (по формуле завода «Электросила»)

$$p_{v2} = 57{,}3\,(D_{бан}^4 l_{бан} + D_R^4 l_R)\ квт, \qquad (84)$$

где $D_{бан}$ и $l_{бан}$ — диаметр и длина бандажа, *м*;
$D_R$ и $l_R$ — диаметр и длина бочки ротора, *м*.

Суммарные потери на вентиляцию

$$p_v = p_{v1} + p_{v2}.$$

В крупных машинах эти потери при воздушном охлаждении составляют до 40% всех потерь.

Примечание: в случае водородного охлаждения

$$p_{v\,вод} = p_v \cdot \frac{\gamma_{вод}}{\gamma_a}.$$

При давлении водорода 1,05 *ата* можно принять отношение $\frac{\gamma_{вод}}{\gamma_a} \approx 0{,}1$ $\left(\text{для чистого водорода это отношение было бы равно } \frac{1}{14{,}38}\right)$. Таким образом, при водородном охлаждении потери на вентиляцию уменьшаются в 10 раз. При повышении давления потери возрастают пропорционально $\left(\frac{p_{вод}}{1{,}05}\right)$.

Суммарные механические потери $p_m = p_т + p_v$ подсчитываются также для турбогенераторов с воздушным охлаждением

$$p_m \approx 320 \cdot D_R^4 \sqrt{l_R}\ квт, \qquad (85)$$

где $D$ и $l$ в *м*;

для явнополюсных синхронных машин с горизонтальным валом

$$p_m = 1{,}83 \cdot 2p \left(\frac{v_a}{40}\right)^3 \sqrt{l}\ квт, \qquad (86)$$

где $v_a$ — окружная скорость, *м/сек*;
$l$ — длина якоря, *м*;

для синхронных машин с вертикальным валом [102]

$$p_m = 0{,}4\,D^3 \left(\frac{n}{100}\right)^2 \sqrt{l}\ квт, \qquad (87)$$

где $D$ — диаметр расточки и длина $l$ в метрах; $n$, об/мин;

для асинхронных машин [150]

$$p_m = (0{,}7 \div 0{,}9)\ \sqrt[3]{\frac{n}{1000}} \sqrt{\frac{1000}{P_2}}\ (\text{в процентах от } P_2), \qquad (88)$$

где $n$ — об/мин;
$P_2$ — полезная мощность, *квт*

(при $n = 3000$ об/мин $p_m$ больше, чем по формуле (88), на 30—60%).



Для асинхронных машин $p_m$ можно определять и в зависимости от диаметра (гл. 11).

Для машин постоянного тока метод расчета суммарных механических потерь дан в гл. 10.

## 5-5. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Общая формула к. п. д. для всех машин

$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}, \qquad (89)$$

здесь $\Sigma p$ — сумма потерь в машине;
$P_2$ — отдаваемая мощность; для генератора переменного тока

$$P_2 = mUI\cos\varphi, \qquad (90)$$

для двигателя

$$P_2 = M\frac{\omega}{p} = M\frac{2\pi f}{p}, \qquad (91)$$

где $M$ выражено в *дж*, или

$$P_2 = 9{,}81\ M\frac{2\pi f}{p},$$

если $M$ выражено в *кгм*.

Определение величины к. п. д. для различных типов машин, расчеты отдельных составляющих потерь и зависимости к. п. д. от нагрузки, а также вопросы выбора к. п. д. рассмотрены в примерных расчетах машин.

## Глава шестая

# ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ

## 6-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ТИПЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Расчет нагрева и теплоотвода машин, в особенности при проектировании новых типов, относится к наиболее важным проблемам проектирования. Конструкция машины и методы теплового расчета во многом определяются системой вентиляции. Поэтому наиболее правильные решения могут быть получены только при комплексном рассмотрении вопросов нагрева и охлаждения.

Прежде всего машина по нагреву должна удовлетворять предписаниям и нормам ГОСТ, построенным, исходя из допустимого срока службы изоляции. На рис. 1 приведены «кривые жизни» изоляции, из которых видно, как температура определяет срок службы машины. Однако дело идет не только о выполнении норм и предписаний. Необходимо (в тепловом и вентиляционном отношении) спроектировать машину так, чтобы она обеспечивала заданную температуру при такой затрате материалов, которая определяется экономическим коэффициентом полезного действия. Другими словами, тепловой и вентиляционный расчет должен быть органически связан с вопросами электрического и экономического расчета.

Необходимо также, чтобы машина обладала тепловым запасом на случай возможных перегрузок и с целью повышения надежности работы.

При расчете вентиляции необходимо стремиться к равномерности нагрева и правильному использованию охлаждающей среды (воздух, водород, масло и т. д.).

Расчет и проектирование машины требуют хорошего знания условий работы машины. Но в особенности этого требует расчет тепловой и вентиляционный. Машина, удовлетворительно работающая в одних окружающих условиях (температура, влажность и т. д.), может быть непригодна для других. То же следует сказать и в отношении технологии. Знание технологии и свойств материалов необходимо при решении всех вопросов проектирования машин, но



особое значение оно приобретает при решении вопросов нагрева и теплоотвода машины. Расчет, в частности, должен показать целесообразность и эффективность применения тех или других сортов изоляции.

На рис. 49, 50, 51 показаны схемы выполнения вентиляции в некоторых типах машин. При аксиальной системе (рис. 49) воздух посредством вентилятора прогоняется вдоль машины по аксиальным каналам статора и ротора, по междуполюсному пространству (в явнополюсных машинах) и по воздушному зазору. В асинхронных машинах с малым зазором часть воздуха, проходящая вдоль зазора, незначительна. Воздух, проходя вдоль машины, подогревается,

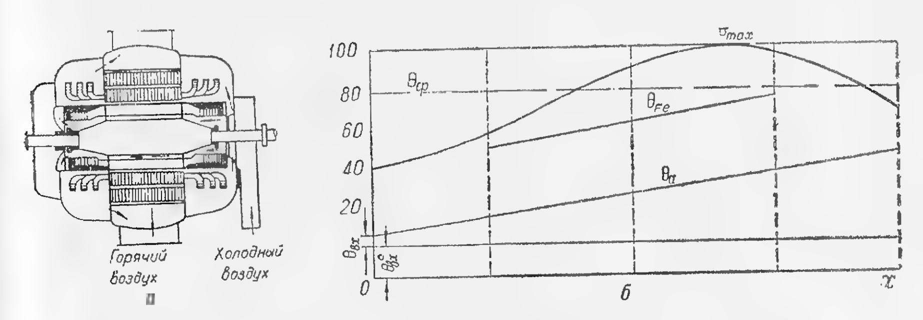



Рис. 49. Аксиальная односторонняя вентиляция:

*а* — машина с аксиальной вентиляцией; *б* — кривые распределения превышения температуры по длине машины.

вследствие чего температура железа и меди распределяется несимметрично по отношению к центру машины, как это показано на рис. 49, *б*.

Вентиляторы могут быть встроенными в машину, т. е. насаженными на вал машины, или независимыми, как это имеет место для случая, показанного на рис. 49. Независимая вентиляция применяется или когда скорость машины изменяется в широких пределах, или в тихоходных машинах.

Во многих случаях приходится делать замкнутые системы вентиляции. На рис. 50 представлена схема замкнутой радиальной системы вентиляции синхронной явнополюсной машины. На роторе таких машин обычно прикрепляются лопатки. При этом полюса ротора и лопатки, действуя как вентилятор, прогоняют воздух по радиальным вентиляционным каналам статора и ротора. Горячий воздух, проходя через воздухоохладители (теплообменники), охлаждается и вновь поступает в каналы (замкнутый цикл). Охладитель представляет собой обычно радиатор, по трубам которого протекает вода. Таким образом, потери машины в конечном счете уносятся охлаждающей водой. Значение кривых *1* и *2* на рис. 50 поясняется в § 7-3.

На рис. 51 показана замкнутая система вентиляции гидрогенератора.

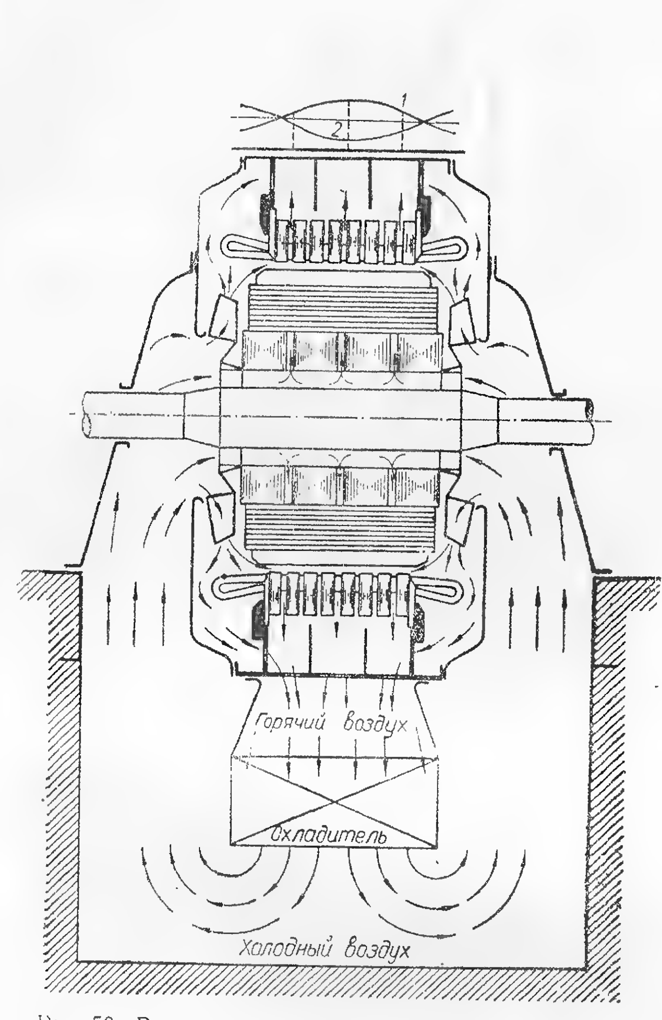



Рис. 50. Радиальная замкнутая вентиляция синхронной машины.



В настоящее время в качестве охлаждающей среды в крупных машинах широко применяется водород (водородное охлаждение), вода и другие вещества, позволяющие обеспечить более интенсивный отвод тепла, выделяемого в машине. В главах 6 и 7, а также в главах, посвященных отдельным типам машин, дана методика расчета нагрева и охлаждения машин при различных системах теплоотвода.

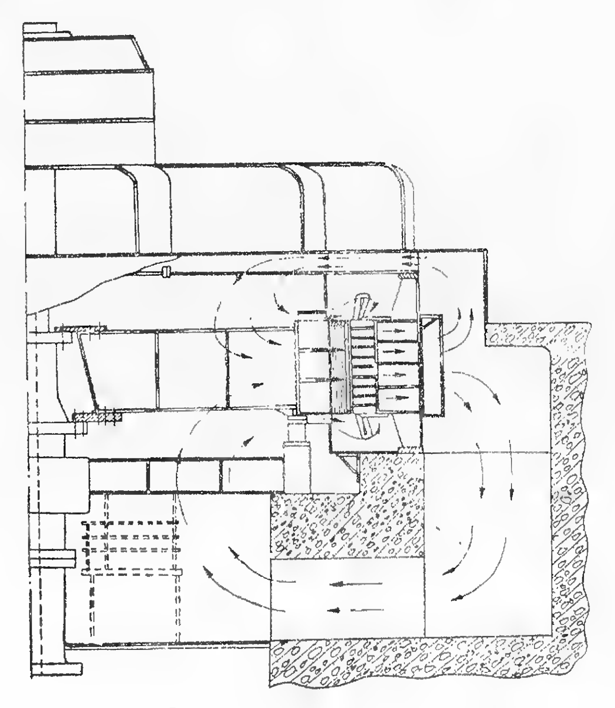


Рис. 51. Схема вентиляции гидрогенератора

## 6-2. ЗАДАЧА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА И ОБЩИЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

### Источники тепла и теплопередача

Источниками тепла являются, главным образом, обмотки и активное железо машин. Правда, в отдельных случаях значительные источники тепла могут появиться и на неактивных частях (поверхность полюсов в синхронных машинах, нажимные плиты статора и т. д.), но, как правило, эти источники имеют второстепенное значение. Благодаря внутренней теплопроводности и теплопередаче поверхностей, соприкасающихся с охлаждающей средой, тепло отводится в конечном счете в окружающую среду и повышает ее температуру. Если машина охлаждается окружающей средой, то при неограниченном ее протяжении (наружные установки) вследствие естественной конвекции температура среды на расстоянии

1—2 *м* остается не зависимой от тепла, выделяемого машиной. При внутренних установках необходимо обеспечить вентиляцию помещения. При замкнутом цикле в машине циркулирует один и тот же объем воздуха*, а тепло уносится проточной водой.

Охлаждающий воздух или другой агент (например водород), проходя через вентиляционную систему машины, отнимает от нагретых поверхностей тепло по *закону внешней теплоотдачи*

$$w = \alpha\theta, \quad (1)$$

Рис. 52. Расположение обмотки в пазу:
*а* — разрез паза; *б* — пакеты железа якоря; *в* — расчетный эскиз.

где $w$ — удельный тепловой поток, снимаемый с единицы поверхности, или плотность теплового потока

$$w = \frac{P}{S}\ вт/см^2;$$

$\alpha = f(v,\theta)$ — коэффициент теплоотдачи, являющийся в основном функцией скорости $v$ омывания воздухом охлаждаемой поверхности и разности температур между поверхностью и воздухом.

Таким образом, между воздухом ** и поверхностью имеет место перепад температуры

$$\theta = \frac{w}{\alpha} = \frac{P}{S\alpha}. \quad (2)$$

* В действительности из-за неплотностей в системе воздух постепенно обменивается.

** Мы везде будем иметь в виду воздух, как наиболее распространенную охлаждающую среду. Однако все рассуждения применимы и для другого газа при подстановке соответствующих постоянных.



Кроме «поверхностных» перепадов, имеют место перепады, определяемые внутренней теплопроводностью материалов. Так, например, при проходе тепла, выделяемого в меди катушек (рис. 52), через слой пазовой изоляции толщиной $\Delta_i$ в последней создается перепад, равный градиенту температуры, умноженному на $\Delta_i$. Теплопередача внутри тела, как известно, характеризуется законом

$$w = -k\,\mathrm{grad}\,\theta. \quad (3)$$

При одноразмерном течении тепла, например, в направлении $x$

$$\mathrm{grad}\,\theta = \frac{d\theta}{dx} \quad (4)$$

или при слое конечной толщины $\Delta_i$

$$\mathrm{grad}\,\theta \approx \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Delta_i}, \quad (5)$$

где $\theta_1$ и $\theta_2$ — температуры на внешней и внутренней поверхности слоя.

Коэффициент пропорциональности $k$ называется коэффициентом внутренней теплопроводности. В табл. 7 сведены коэффициенты теплопроводности наиболее употребительных в электромашиностроении материалов.

Таким образом, мы имеем систему тел (медь статора, железо статора, медь ротора, железо ротора) с распределенными внутренними источниками тепла. Эти тела (рис. 52) разделены пограничными слоями (изоляцией), часть которых является взаимной (например, часть обмотки, уложенная в пазы якоря), а другая (лобовые части) омывается непосредственно охлаждающим воздухом.

Каждое такое тело имеет внутреннее распределение температуры и внутренние перепады температуры, поскольку внутренняя теплопроводность не равна бесконечности. Таким образом, задача определения максимальной температуры какой-либо части машины состоит в определении общего закона течения тепла и в конечном результате — суммы внутренних и внешних перепадов температуры, или превышения температуры рассматриваемой части над охлаждающей средой. Учитывая далее подогрев самой охлаждающей среды, получим искомое превышение температуры над базовой температурой, за которую принимают температуру холодного (не подогретого) воздуха. На рис. 53 схематически представлены отдельные перепады и общее превышение температуры обмотки якоря над холодным воздухом.

Строгий расчет температуры при *установившемся режиме* требовал бы решения системы уравнений с частными производными для каждого из тел, составляющих машину, так как в каждом теле распределение температуры подчиняется *уравнению стационарной теплопроводности*

$$k_x\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + k_y\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + k_z\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} + p_0' = 0, \quad (6)$$

где $k_x$, $k_y$, $k_z$ — коэффициенты теплопроводности в направлении $x$, $y$, $z$ (в общем случае не равные друг другу);

$p_0'$ — количество тепла, выделяющееся в единице объема (в общем случае функция $x$, $y$, $z$).

В частности, если тепло течет в одном направлении, как это может быть, например, принято при передаче тепла через слой пазовой изоляции, а тепло, выделяемое внутри объема изоляции $p'_0 = 0$, мы получим

$$k_x \frac{d^2\theta}{dx^2} = 0$$

или

$$\frac{d\theta}{dx} = B; \quad \theta = Bx + A,$$

т. е. линейное возрастание температуры от $\theta_1$ до $\theta_2$.

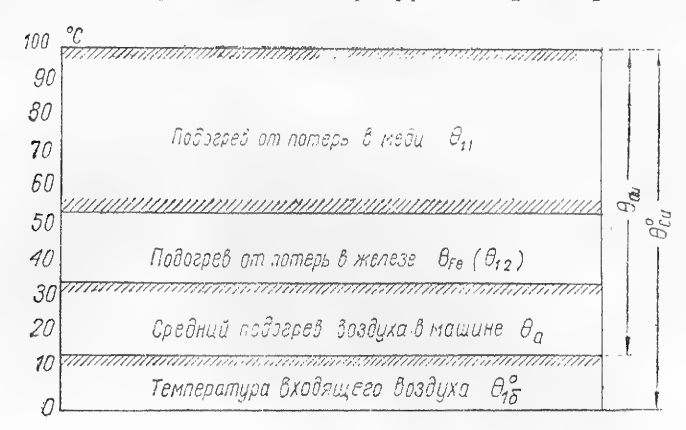



Рис. 53. Схема отдельных перепадов температуры меди.

При передаче тепла в одном направлении ($x$) в области с постоянной плотностью источников $p'_0$, например в листовом пакете (рис. 54), имеем

$$k_x \frac{d^2\theta}{dx^2} + p'_{0x} = 0. \qquad (7)$$

Отсюда после интегрирования получаем

$$\theta = A + Bx - \frac{1}{2k_x} p'_{0x} x^2, \qquad (8)$$

т. е. параболическое распределение температуры. Величина $p'_{0x}$ представляет некоторую часть удельных потерь $p'_0$. Постоянные $A$ и $B$ найдутся из пограничных условий. Для рассматриваемого случая — пакета согласно рис. 54 при $x = \frac{1}{2} l'$ $\theta = \theta_{s2}$, при $x = -\frac{1}{2} l'$ $\theta = \theta_{s1}$. Уравнение распределения температуры по ширине пакета при этих условиях

$$\theta = \frac{\theta_{s1} + \theta_{s2}}{2} + \frac{\theta_{s2} - \theta_{s1}}{l'} x + \frac{1}{2k_x} p'_{0x} \left(\frac{l'}{2}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{2x}{l'}\right)^2\right]. \qquad (9)$$



Среднее значение $\theta_{Fe}$ по ширине пакета при $\theta_{s1} = \theta_{s2} = \theta_s$

$$\theta_{Fe} = \frac{1}{l'} \int \theta\, dx = \theta_s + \frac{1}{12k_x} p'_{0x} (l')^2 = \theta_s + \Delta\theta_{ср}, \qquad (10)$$

где

$$\theta_s = \frac{\theta_{s1} + \theta_{s2}}{2};$$

$$\Delta\theta_{ср} = \frac{p'_{0x} (l')^2}{12k_x}. \qquad (11)$$

Максимальный перепад согласно уравнению (9) при $\theta_{s1} = \theta_{s2} = \theta_s$ будет в центре пакета и будет равен

$$\Delta\theta_{max} = \frac{p'_{0x} (l')^2}{8k_x}. \qquad (12)$$

Максимальное превышение температуры железа

$$\theta_{Fe\,max} = \theta_s + \Delta\theta_{max}. \qquad (13)$$

Тепло, отданное поверхностью двух сторон пакета $S_s$, равно теплу, создаваемому в пакете, т. е.

$$\theta_s \alpha S_s = 0{,}5 S_s l' p'_{0x}. \qquad (14)$$

Подставляя значение $p'_{0x}$ из этой формулы в уравнение (10), получим

$$\theta_s = \theta_{Fe} \frac{\xi}{1 + \xi}; \qquad (15)$$

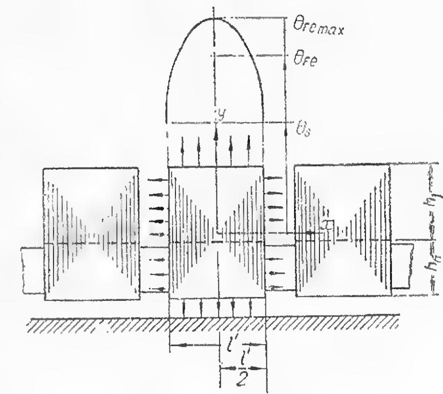



Рис. 54. Определение температуры пакета железа статора.

$$\Delta\theta_{ср} = \theta_{Fe} - \theta_s = \theta_{Fe} \cdot \frac{1}{1 + \xi} = \theta_s \cdot \frac{1}{\xi}, \qquad (15a)$$

где $\xi = \frac{6k_x}{\alpha l'}$.

Величина $\xi$ представляет здесь отношение внутренней теплопроводности пакета к внешней теплоотдаче в каналы.

В случае двухразмерного течения тепла и с учетом пограничных условий задача становится весьма сложной и решается, как увидим ниже, приближенно (§ 6-4).

При *неустановившемся режиме* задача была бы еще более трудной, так как потребовала бы решения уравнений нестационарной теплопроводности вида

$$k_x \frac{\partial^2\theta(t)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2\theta(t)}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2\theta(t)}{\partial z^2} + p'_0 = c\gamma \frac{\partial\theta(t)}{\partial t}, \qquad (16)$$

где $c$ — удельная теплоемкость и $\gamma$ — плотность материала.

Ввиду относительно высокой внутренней теплопроводности меди и железа температура внутри объема данного тела в первом приближении может быть принята постоянной с тем, чтобы при дальнейшем уточнении установить порядок величины внутренних перепадов. Поэтому задачу расчета можно свести к двум, трем или четырем *однородным* телам, связанным взаимными тепловыми проводимостями.

## Нагрев машины как одного тела

Для *одного* тела уравнение нагрева, выражающее баланс энергии, имеет вид

$$C\frac{d\theta^\circ(t)}{dt}+\Lambda[\theta^\circ(t)-\theta_a^\circ]=p, \qquad (17)$$

где $C=cG$ — полная теплоемкость тела;
$c$ — удельная теплоемкость;
$G$ — вес тела;
$\Lambda$ — тепловая проводимость от тела к охлаждающему воздуху, причем $\Lambda=\alpha S$;
$\theta_a^\circ$ — температура воздуха;
$\theta^\circ(t)$ — температура тела, измеряемая от 0° С.

Если $\theta^\circ(t)-\theta_a^\circ$ обозначить через $\theta_{11}(t)$ и считать, что $\theta_a^\circ=\mathrm{const}$, то можно также написать

$$C\frac{d\theta_{11}(t)}{dt}+\Lambda\theta_{11}(t)=p, \qquad (18)$$

т. е. тепло $p$, созданное внутри тела в единицу времени за вычетом количества тепла $\Lambda\theta_{11}(t)$, отданного через поверхность $S$, идет на повышение температуры тела $\left(C\frac{d\theta_{11}(t)}{dt}\right)$.

Наиболее грубым, но зато самым простым, будет рассмотрение машины как одного тела. Ближе всего подходят для такого рассмотрения закрытые машины, температура внутренних частей которых, как показывает опыт, может быть принята приблизительно одинаковой. В этом случае установившееся превышение температуры при $p=\mathrm{const}$ равно

$$\theta_{11}=\frac{p}{\Lambda}=\frac{p}{\alpha S}=\frac{w}{\alpha}, \qquad (19)$$

так как

$$\frac{d\theta(t)}{dt}=0.$$

Уравнение нагрева (18) представим в виде

$$\frac{d\theta_{11}(t)}{dt}+\frac{\Lambda}{C}\theta_{11}(t)=\frac{p}{C}=\frac{p}{\Lambda}\cdot\frac{\Lambda}{C}. \qquad (20)$$

Его решение при $p=\mathrm{const}$ дает экспоненту нагрева

$$\theta_{11}(t)=\theta_{11}\left(1-e^{-\frac{t}{T}}\right), \qquad (21)$$

где

$$T=\frac{C}{\Lambda}=\frac{cG}{\alpha S} \qquad (22)$$

называется *постоянной времени нагрева*.

При охлаждении в уравнении (20) надо положить $p=0$. Решение дает $\theta_{11}(t)=\theta_{11}e^{-\frac{t}{T}}$.

Кривые нагрева и охлаждения приведены на рис. 55.



Поскольку условия охлаждения могут отличаться от условий нагрева, постоянная времени охлаждения также может отличаться (иногда значительно) от постоянной времени нагрева.

Постоянная времени нагрева однородного тела зависит от веса и теплоемкости тела, а также от величины поверхности и коэффициента теплоотдачи $\alpha$. Как можно видеть из рис. 55, при $t=(3\div4)T$ температура $\theta_{11}(t)$ практически может быть принята равной установившемуся значению $\theta_{11}$.

Поэтому весьма удобно выражение для $T$ через $\theta_{11}$, которое получим, подставляя $\alpha S=\frac{p}{\theta_{11}}$ в (22),

$$T=\frac{cG\theta_{11}}{p}. \qquad (23)$$

Так как $\frac{p}{G}=p'$ характеризует удельные потери, *вт/кг*, а последние зависят от обычно мало изменяющихся удельных нагрузок, то постоянная времени может быть легко оценена по установившейся температуре и удельным потерям:

а) для меди

$$T_{\mathrm{Cu}}=c_{\mathrm{Cu}}\frac{\theta_{11}}{p'_{\mathrm{Cu}}}=c_{\mathrm{Cu}}\frac{\theta_{11}}{k_{\mathrm{Cu}}s^2}; \qquad (24)$$

б) для железа

$$T_{\mathrm{Fe}}=c_{\mathrm{Fe}}\frac{\theta_{22}}{p'_{\mathrm{Fe}}}=c_{\mathrm{Fe}}\frac{\theta^*_{22}}{k_{\mathrm{Fe}}B^2}. \qquad (25)$$

Рис. 55. Кривые нагрева и охлаждения:
*1* — экспонента нагрева; *2* — действительная кривая; *3* — экспонента охлаждения.

Принимая в среднем $p'_{\mathrm{Cu}}=25$ *вт/кг*, $c_{\mathrm{Cu}}=388$ *дж/кг*° С, $p'_{\mathrm{Fe}}=7$ *вт/кг* и $c_{\mathrm{Fe}}=462$ *дж/кг*°С, получим (рассматривая как однородные тела)

$$T_{\mathrm{Cu}}=15{,}5\theta_{11} \text{ и } T_{\mathrm{Fe}}=66\theta_{22}. \qquad (26)$$

При $\theta_{11}=40$°С имеем $T_{\mathrm{Cu}}=620$ сек., или 10,3 мин.; эта величина весьма близка к опытным значениям для большого числа машин. При $\theta_{22}=30$° С получим $T_{\mathrm{Fe}}=1980$ сек., или 33 мин.

Постоянная времени нагрева, следовательно, тем *больше*, чем *меньше* использование материалов машины, принятое при проектировании, т. е. чем меньше принятые величины удельных потерь.

Существует ошибочное мнение, что постоянная времени тем больше, чем крупнее машина. Опыт показывает, что, например, малая закрытая машина $P=5$ *квт* может иметь постоянную нагрева большую, чем открытая и хорошо вентилируемая машина $P=5000$ *квт* **.

* Постоянные $T_{\mathrm{Cu}}$ и $T_{\mathrm{Fe}}$ не представляют собой *действительных* величин в реальной машине, так как здесь не учитывается взаимный нагрев и влияние теплоемкости конструктивного материала. В § 6-6 получены действительные значения постоянных.

** Для геометрически подобных машин с ростом мощности постоянная времени возрастает, но весьма медленно.

Использование уравнения (18) для расчета температур возможно и целесообразно не только в закрытых машинах, но и в открытых машинах в тех случаях, когда каждая часть машины может рассматриваться независимо. Так, например, в крупных синхронных машинах статор и ротор разделены большим и хорошо вентилируемым воздушным зазором. В этом случае нагрев этих частей с достаточной точностью может быть рассматриваем независимо. Каждую из этих частей при некоторых условиях оказывается возможным рассматривать как однородное тело. Так, опыт показывает, что только в начале приложения нагрузки медь якоря греется быстрее железа, но после некоторого весьма небольшого времени медь и железо нагреваются приблизительно как однородное тело (см. рис. 55, кривая *2*). Несмотря на это, теория одного тела не может удовлетворить конструктора. Используя высокоразвитые методы электрических расчетов, позволяющих рассчитывать характеристики машины с точностью до $2{,}5 \div 5\%$, конструктор, естественно, не может удовлетвориться низкой точностью тепловых расчетов. Понятным поэтому является появление значительного количества работ, посвященных уточнению тепловых расчетов. Однако нельзя сказать, что этот вопрос вполне исследован.

Это видно хотя бы из того, что до сих пор в тепловых расчетах не существует даже такого (весьма относительного) единства языка и терминологии, какое существует в электрических расчетах.

В данной книге делается попытка установить определенную терминологию и обозначения в тепловых расчетах.

### Эквивалентные тепловые схемы для двух тел

При тепловых расчетах, так же как и при электрических, оказывается удобным использование эквивалентных схем, или схем замещения. Существование такой схемы легко показать на примере нагрева двух связанных тел *1* и *2* (рис. 56). Согласно закону баланса тепловой энергии имеем очевидные уравнения:

$$\left.\begin{aligned} C_1\frac{d\theta_1(t)}{dt} + \Lambda_{12}[\theta_1(t) - \theta_2(t)] + \Lambda_1\theta_1(t) = p_1, \\ C_2\frac{d\theta_2(t)}{dt} + \Lambda_{21}[\theta_2(t) - \theta_1(t)] + \Lambda_2\theta_2(t) = p_2, \end{aligned}\right. \qquad (27)$$

т. е. количество тепловой энергии, выделенное в данном теле, расходуется: а) на повышение температуры тела, б) на передачу другому телу и в) на передачу окружающей среде. Здесь $C_1 = c_1G_1$, $C_2 = c_2G_2$ — теплоемкости тел *1* и *2*; $\Lambda_{12}$ и $\Lambda_{21}$ — взаимные тепловые проводимости тел *1* и *2*; $\Lambda_1$ и $\Lambda_2$ — тепловые проводимости от тел *1* и *2* к охлаждающей среде; $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$ — превышения температуры над температурой охлаждающей среды*.

---

* Это превышение нельзя смешивать с превышением температуры над *базовой температурой входящего воздуха* $\theta_{1б}$. Последнее равно $\theta_1 + \theta_a$, где $\theta_a$ — *превышение* температуры охлаждающей среды над $\theta_{1б}$.



Эти тепловые проводимости для вентилируемых машин можно считать независимыми от $\theta$.

Для *установившегося* режима при $p = \text{const}$

$$\frac{d\theta_1(t)}{dt} = \frac{d\theta_2(t)}{dt} = 0,$$

и мы получим систему линейных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \theta_1(\Lambda_1 + \Lambda_{12}) - \Lambda_{12}\theta_2 = p_1 \\ -\theta_1\Lambda_{21} + (\Lambda_2 + \Lambda_{21})\,\theta_2 = p_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (28)$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 = \frac{p_1 + k_{12}p_2}{\Lambda_1 + k_{12}\Lambda_2} \\ \theta_2 = \frac{p_2 + k_{21}p_1}{\Lambda_2 + k_{21}\Lambda_1} \end{aligned}\right\}, \qquad (29)$$

где

$$\left.\begin{aligned} k_{12} = \frac{\Lambda_{12}}{\Lambda_2 + \Lambda_{21}} \\ k_{21} = \frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_1 + \Lambda_{12}} \end{aligned}\right\}. \qquad (30)$$

Знаменатели выражений (29) представляют собой эквивалентные тепловые проводимости

$$\left.\begin{aligned} \Lambda_1' = \Lambda_1 + \frac{\Lambda_2 \cdot \Lambda_{12}}{\Lambda_2 + \Lambda_{21}} \\ \Lambda_2' = \Lambda_2 + \frac{\Lambda_1 \cdot \Lambda_{21}}{\Lambda_1 + \Lambda_{12}} \end{aligned}\right\}. \qquad (31)$$

Как видно, эквивалентные проводимости могут быть представлены схемой, подобной схеме замещения трансформатора (рис. 56, *б*, *в*). Поэтому уравнения (29) можно записать в виде:

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 = \frac{p_1 + k_{12}p_2}{\Lambda_1'} \\ \theta_2 = \frac{p_2 + k_{21}p_1}{\Lambda_2'} \end{aligned}\right\}. \qquad (32)$$

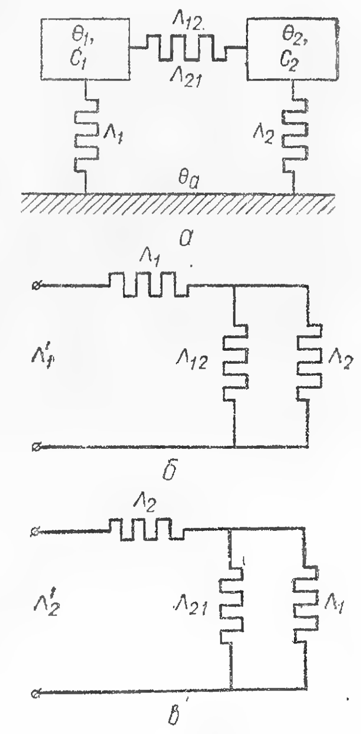



Рис. 56. Тепловые схемы:

*а* — схема нагрева двух тел; *б* — эквивалентная схема первого тела; *в* — эквивалентная схема второго тела.

Если ввести также «тепловые сопротивления»

$$R_1 = \frac{1}{\Lambda_1};\ R_2 = \frac{1}{\Lambda_2};\ R_{21} = \frac{1}{\Lambda_{21}}, \qquad (33)$$

то получим:

$$\Lambda_1' = \frac{1}{R_1'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_{21}} \qquad (34)$$

и

$$\Lambda_2' = \frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + R_{12}}. \qquad (35)$$

Уравнения (29) для превышений температуры можно переписать в виде

$$\theta_1 = \frac{p_1 + k_{12}p_2}{\Lambda_1'} = \theta_{11к} + \theta_{12о}; \tag{36}$$

$$\theta_2 = \frac{p_2 + k_{21}p_1}{\Lambda_2'} = \theta_{22о} + \theta_{21к}, \tag{37}$$

где

$$\theta_{11к} = \frac{p_1}{\Lambda_1'}; \; \theta_{12о} = \frac{k_{12}p_2}{\Lambda_1'}; \tag{38}$$

$$\theta_{22о} = \frac{p_2}{\Lambda_2'}; \; \theta_{21к} = \frac{k_{21}p_1}{\Lambda_2'}. \tag{39}$$

Из этих уравнений видно, что вследствие линейности исходных уравнений температуры $\theta_1$ и $\theta_2$ могут быть найдены *по методу наложения* из опытов при $p_1 = 0$ и $p_2 = 0$ (например из опытов холостого хода и короткого замыкания). В уравнениях (36) и (37) $\theta_{11к}$ и $\theta_{21к}$ — перепады температуры между медью и охлаждающим воздухом и, соответственно, между железом и охлаждающим воздухом в опыте короткого замыкания, $\theta_{12о}$ и $\theta_{22о}$ — то же в опыте холостого хода.

Введение эквивалентных проводимостей $\Lambda_1'$ и $\Lambda_2'$ соответственно схемам рис. 56, *б* и *в* является целесообразным, так как эти постоянные легко определяются как из расчета, так и из опыта.

Если произвести два опыта нагрева при $p_1 = 0$ и $p_2 = 0$ и измерить четыре *средних* температуры: $\theta_{11_к} = \theta_{1(p_2=0)}$; $\theta_{22_о} = \theta_{2(p_1=0)}$; $\theta_{12_о} = \theta_{1(p_1=0)}$; $\theta_{21_к} = \theta_{2(p_2=0)}$, то, измерив также потери в этих опытах, найдем постоянные

$$\Lambda_1' = \left(\frac{p_1}{\theta_1}\right)_{p_2=0}; \quad \Lambda_2' = \left(\frac{p_2}{\theta_2}\right)_{p_1=0} \tag{40}$$

и коэффициенты $k_{12}$ и $k_{21}$

$$k_{12} = \left(\frac{\theta_1}{p_2}\right)_{p_1=0} \cdot \Lambda_1'; \; k_{21} = \left(\frac{\theta_2}{p_1}\right)_{p_2=0} \cdot \Lambda_2'. \tag{41}$$

Решение уравнений (30) — (35) для $\Lambda_1$, $\Lambda_2$, $\Lambda_{12}$, $\Lambda_{21}$ через опытные значения $\Lambda_1'$, $\Lambda_2'$, $k_{12}$ и $k_{21}$ дает

$$\Lambda_1 = \frac{R_2' - k_{12}R_1'}{R_1'R_2'(1 - k_{12}k_{21})}; \quad \Lambda_2 = \frac{R_1' - k_{21}R_2'}{R_1'R_2'(1 - k_{12}k_{21})}; \tag{42}$$

$$\Lambda_{12} = \frac{k_{12}}{R_2'(1 - k_{12}k_{21})}; \; \Lambda_{21} = \frac{k_{21}}{R_1'(1 - k_{21}k_{12})}, \tag{43}$$

где

$$R_1' = \frac{1}{\Lambda_1'} = \left(\frac{\theta_1}{p_1}\right)_{p_2=0}; \quad R_2' = \frac{1}{\Lambda_2'} = \left(\frac{\theta_2}{p_2}\right)_{p_1=0}. \tag{44}$$

### Эквивалентные схемы для трех и более тел

Уточнение расчетов может быть получено, если рассматривать машину как три тела. Например: 1) обмотка якоря, 2) железо якоря, 3) ротор. Это уточнение произведено в § 6-5. Далее, ротор можно рассматривать также как два тела, т. е. для всей машины



получим схему 4 тел. Наконец, обмотку якоря с изоляцией можно рассматривать как несколько тел. Мы приходим к задаче о решении системы линейных уравнений и о изображении этой системы эквивалентной схемой, состоящей из $n$ связанных контуров. К этой схеме могут быть применены все выводы теории электрических цепей. Аналитическое решение при $n > 3$ получается достаточно сложным. В случае необходимости можно составить соответствующую физическую или математическую модель с применением счетно-решающих устройств. Надо, однако, иметь в виду, что увеличение числа тел не всегда оправдывается, так как определение постоянных схемы замещения является весьма приближенным.

## 6-3. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООТДАЧИ

При тепловых расчетах, как мы видели, необходимо определить:

1) источники тепла, т. е. потери в различных частях машины;

2) эквивалентную тепловую схему, т. е. схему направления тепловых потоков к охлаждающей среде (эта схема может быть определена сначала приближенно, т. е. без учета распределения температуры внутри объемов);

3) коэффициенты теплопроводности на отдельных участках тепловой схемы, необходимые для определения перепадов температуры на этих участках;

4) коэффициенты теплоотдачи при сходе тепловых потоков с охлаждаемых поверхностей;

5) скорости воздуха у теплоотдающих поверхностей для определения коэффициентов теплоотдачи;

6) температуры охлаждающей среды у охлаждаемых поверхностей.

Рис. 57. Определение эквивалентной теплопроводности слоистой изоляции.

Расчет потерь рассмотрен в гл. 5. Метод составления эквивалентной тепловой схемы рассмотрен выше (рис. 56).

К о э ф ф и ц и е н т ы т е п л о п р о в о д н о с т и основных материалов, употребляемых в электромашиностроении, приведены в табл. 7. В электрических машинах мы часто имеем дело с неоднородной средой, например изоляцией паза (рис. 57), состоящей из $n$ слоев разных материалов. В таких случаях можно найти эквивалентный коэффициент теплопроводности из очевидного равенства

$$R_i = \frac{\Delta_i}{k_i} = \frac{\Delta_1}{k_1} + \frac{\Delta_2}{k_2} + \ldots + \frac{\Delta_n}{k_n} = \sum \frac{\Delta_n}{k_n}, \tag{45}$$

т. е.

$$k_i = \frac{\Delta_i}{\sum \frac{\Delta_n}{k_n}}. \tag{46}$$

Коэффициент эквивалентной теплопроводности для пазовой изоляции класса $A$ $k_i \approx 0{,}0010 - 0{,}0015$ *вт/см* °С, для пазовой изоляции класса $B$ $k_i \approx 0{,}00175 - 0{,}002$ *вт/см* °С.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha$, определяемые по (1) как отношение теплового потока с единицы поверхности к перепаду температуры между поверхностью и охлаждающей средой, зависят от параметров охлаждающей среды (плотность, вязкость, теплопроводность), скорости движения, характера охлаждающих поверхностей и т. д.

Согласно учению о теплообмене различают следующие основные виды теплоотдачи:

1) теплоотдача при естественной конвекции для жидкостей и газов;

2) теплоотдача при лучеиспускании;

3) теплоотдача при принудительном движении жидкостей или газов;

4) теплоотдача при испарении.

Все эти виды имеют место в электрических машинах.

Коэффициенты теплоотдачи определяются с помощью безразмерных критериев теории подобия.

Основными безразмерными критериями являются: критерий Рейнольдса Re, Нуссельта Nu, Прандтля Pr.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \tag{47}$$

представляет собой отношение скорости течения жидкости или газа к его кинематической вязкости $\nu$, отнесенной к величине гидравлического диаметра канала $d$

$$d = \frac{4S}{\Pi},$$

где $S$ и $\Pi$ — сечение и периметр канала. Физически Re означает отношение инерционных сил к силам трения. При $Re < 2320$ имеем ламинарное течение.

Критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{k}, \tag{48}$$

где $\alpha$ — коэффициент теплоотдачи, $\frac{вт}{см^2 \, °C}$;

$k$ — теплопроводность жидкости или газа, $\frac{вт}{см \, °C}$.

Физически, для случая каналов, критерий Нуссельта означает отношение коэффициента теплоотдачи к теплопроводности слоя, толщина которого равна гидравлическому диаметру $d$. Для охлаждаемых открытых поверхностей вместо $d$ следует подставлять длину или высоту охлаждаемой поверхности.

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a} \tag{49}$$



*Таблица 7*

**Теплопроводность, теплоемкость и плотность материалов, употребляемых в электромашиностроении**

| Материалы | $k$ | $c$ | $\gamma$ |
|---|---|---|---|
| | (в *вт/см* °С) | (в *дж/г* °С) | (в *г/см*³) |
| Алюминий | 2,05 | 0,816 | 2,60 |
| Медь | 3,75 | 0,390 | 8,90 |
| Сталь листовая динамная вдоль слоя * | 0,65 | 0,462 | 7,55—7,65 |
| Сталь листовая поперек слоя с 10% бумаги | 0,01200 | — | — |
| То же в атмосфере водорода | 0,026 | — | — |
| Латунь | 1,04400 | 0,384 | 8,60 |
| Асбест | 0,00194 | 0,815 | 2,50 |
| Слюда | 0,00360 | 0,862 | 3,00 |
| Миканитовая гильза (прессованная) | 0,00120—0,00150 | — | 2,30 |
| Лакоткань | 0,00210 | — | — |
| Шелк | 0,00059 | 1,673 | 1,56 |
| Бумага | 0,00069 | 1,510 | 1,48 |
| Пропитанная лаком бумага | 0,00270 | — | — |
| Кабельная изоляция | 0,00110 | — | — |
| Дерево вдоль волокон | 0,00126 | 2,510 | 0,31—0,76 |
| Дерево поперек волокон | 0,00037 | — | — |
| Масло | 0,00164 | 1,800 | 0,95 |
| Вода | 0,00628 | 4,184 | 1,00 |
| Воздух при 760 *мм* рт. ст., 20° | 0,000251 | — | 0,001205 |
| Воздух при 760 *мм* рт. ст., 40° | 0,000265 | 1,009 | 0,001128 |
| Воздух при 760 *мм* рт. ст., 60° | 0,000279 | — | 0,00106 |
| Воздух при 760 *мм* рт. ст., 80° | 0,000293 | — | 0,001 |
| Водород | 0,00175 | — | — |
| Электрокартон, пропитанный маслом | 0,00250 | — | — |
| Электрокартон лакированный | 0,00140 | — | — |
| Резина | 0,00186 | — | — |
| Эмаль, фарфор | 0,01970 | — | — |

представляет отношение кинематической вязкости $\nu$ к температуропроводности $a$,

$$a = \frac{k}{c_p \cdot \rho} \; \frac{см^2}{сек},$$

где $c_p$ — теплоемкость при постоянном давлении, $\frac{дж}{кг \, °C}$;

$\rho$ — плотность среды, $\frac{кг}{см^3}$.

* Для легированной стали $k = 0{,}3 - 0{,}45$.

Критериальное уравнение теплообмена имеет вид

$$\mathrm{Nu} = c\,\mathrm{Re}^n \cdot \mathrm{Pr}^m, \tag{50}$$

где $c$, $n$, $m$ — постоянные.

Для жидкости или газа при течении по каналу

$$\mathrm{Nu} = 0{,}023\mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4}. \tag{50a}$$

Принимая во внимание, что для газов $\frac{\nu}{a}$ и $k$ почти не зависят от давления $p$, а $\nu$ обратно пропорционально $p$, из уравнений (47) — (50) получаем коэффициент теплоотдачи в виде

$$\alpha = 0{,}023\frac{k}{d}\left(\frac{vd}{\nu}\right)^{0,8}\left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,4} \cdot p^{0,8} \tag{51}$$

(при этом вязкость $\nu$ соответствует $p = 1$ *ата*).

При учете длины канала $L$, *см*

$$\alpha \approx 0{,}023k^{0,6} \cdot d^{-0,2}\nu^{-0,4}(c_p\rho)^{0,4} \cdot v^{0,8}\left(\frac{30}{L}\right)^{0,25} \cdot p^{0,8}\,\frac{вт}{см^2\,°\mathrm{C}}, \tag{51a}$$

где $v$ — скорость, *см/сек*, $\nu$ — $\frac{см^2}{сек}$, $d$ — *см*, $k$ — $\frac{вт}{см\ \mathrm{C}}$, $c_p$ — $\frac{дж}{кг°\mathrm{C}}$, $\rho$ — $\frac{кг}{см^3}$.

Параметры охлаждающей среды $k$, $\nu$, $c_p$, $\rho$, $a$ имеются в технических справочниках. В среднем для $\theta° = 50°$ C и $p = 1$ *ата* можно принимать их в соответствии с таб. 8.

Расчеты согласно (51a) показывают, что в пределах от 50° C до 80° C $\alpha$ пропорционально давлению газа в *ата* в степени 0,8 и в малой степени зависит от температуры.

При свободной конвекции в воздухе

$$\alpha = c_0\theta^{0,25}, \tag{52}$$

где $\theta$ — превышение температуры охлаждаемой поверхности над температурой свободного пространства на расстоянии 1 *м* от поверхности. Постоянная $c_0$ равна

$$c_0 \approx 3{,}135\left(\frac{1}{H}\right)^{0,25},$$

где $H$ — высота вертикальной поверхности, *м*.

При свободной конвекции в воде и масле $\alpha$ определяется по (188), (209) и (210).

Теплоотдача при водородном и жидкостном охлаждении рассматривается в § 7-5 и § 12-13, теплоотдача при излучении — в § 6-8.

При воздушном охлаждении коэффициенты теплоотдачи, *вт/см*² °C или *вт/м*² °C, определяются по приближенным формулам или по кривым в функции скорости охлаждающего воздуха или окружной скорости ротора:

1. Для радиальных каналов статора по Рихтеру при скорости движения воздуха в каналах $v_s \geqslant 5$ *м/сек*

$$\alpha_s = 0{,}0012\left(\frac{20}{h_п + h_j}\right)^{0,25} v_s^{0,75}\,вт/см^2\,°\mathrm{C}, \tag{53}$$



*Таблица 8*

**Параметры охлаждающей среды**

| Охлаждающая среда | $k$ (в $\frac{вт}{см°\mathrm{C}}$) | $\nu$ (в $\frac{см^2}{сек}$) | $c_p$ ($\frac{дж}{г°\mathrm{C}}$) | $\rho$ (в $\frac{г}{см^3}$) | $a$ (в $\frac{см^2}{сек}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Воздух . . . . | $2{,}77 \cdot 10^{-4}$ | 0,173 | 1,006 | $10{,}9 \cdot 10^{-4}$ | 0,258 |
| Водород . . . | $19{,}5 \cdot 10^{-4}$ | 1,22 | 14,3 | $0{,}77 \cdot 10^{-4}$ | 1,77 |
| Масло (трансформаторное) | $13 \cdot 10^{-4}$ | 0,07 | 1,7 | 0,86 | 0,01 |
| Вода . . . . . | $64 \cdot 10^{-4}$ | 0,00556 | 4,16 | 0,99 | 0,00156 |

где $h_п$, $h_j$ — высота зубца и высота ярма, *см*. (Более точно по кривым рис. 58.)

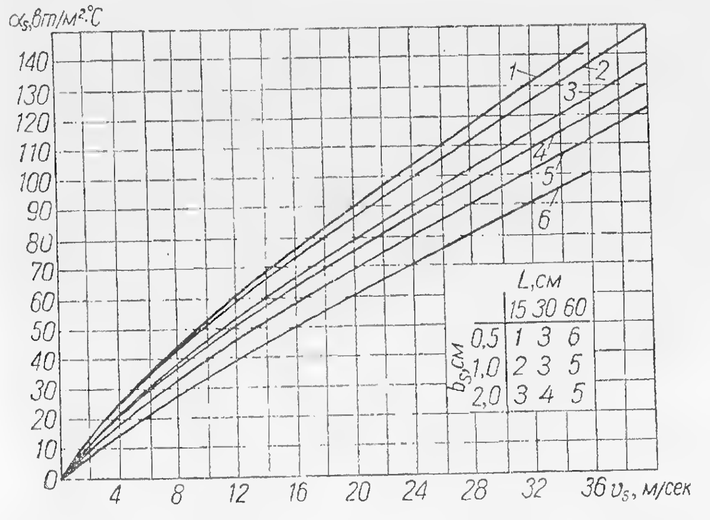



Рис. 58. Коэффициент теплоотдачи радиальных каналов. Кривые *1, 2, 3, 4, 5, 6* соответствуют различной длине и ширине каналов.

2. Для аксиальных каналов статора длиной $l_k$ *см*

$$\alpha_s \approx 0{,}00167\,(1 + v_s^{0,5})\left(\frac{10}{l_k}\right)^{0,25} \tag{53a}$$

(см. также рис. 59, *а* и формулу (51a).

3. Для теплоотдачи в воздушный зазор с поверхности внешнего или внутреннего якоря (без учета длины)

$$\alpha_\delta = 0{,}0028\,(1 + v_\delta^{0,5}) \tag{54}$$

(см. также рис. 60 и 59, *б*, где $v$ означает окружную скорость ротора).

4. Для внешней поверхности спинки машины с радиальной вентиляцией

$$\alpha_j = 0{,}0028\,(1 + v_j^{0,5}). \tag{55}$$

5. Для поверхности лобовых частей

$$\alpha_л = 0,00167\,(1 + v_л^{0,5}) \qquad (56)$$

(более точно по рис. 61).

6. Для катушек полюсов:

а) для однорядных из ленточной голой меди

$$\alpha_f = 0,0028\,(1 + v_f^{0,5}) \qquad (57)$$

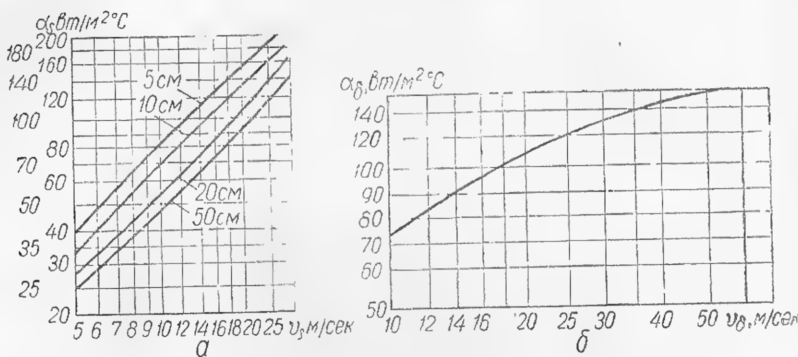



Рис. 59. Коэффициент теплоотдачи:

*а* — в аксиальных каналах различной длины роторов синхронных машин; *б* — с поверхности роторов.

(или по кривым рис. 62 и 63, *а* в зависимости от окружной скорости ротора $v_a$ и с учетом влияния отношения $\frac{l}{\tau}$);

б) для неподвижных и вращающихся многослойных катушек

$$\alpha_f = 0,0012\,(1 + v_f^{0,5}) \qquad (57а)$$

(более точно по кривой рис. 63, *б*).

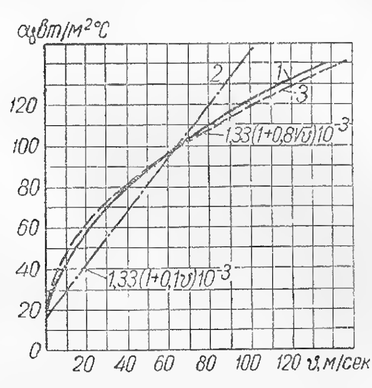



Рис. 60. Коэффициент теплоотдачи якоря и катушек машин постоянного тока в функции окружной скорости:

*1* — опытная кривая; *2* и *3* — аналитические кривые.

7. Для коллекторов без особого охлаждения и с особым охлаждением по кривым рис. 64. При отсутствии особого охлаждения

$$\alpha_k \approx 0,0052\,(1 + 0,5v_k^{0,5}), \qquad (58)$$

где $v_k$ — окружная скорость коллектора.

Скорости воздуха в формулах для $\alpha$. Точное распределение скоростей воздуха в машине практически неизвестно, так как их измерение и расчет встречают большие трудности (вихревое движение). Однако для вычисления $\alpha$ достаточно знать *среднее значение* скорости воздуха или точнее некоторое *условное* значение скорости,



близкое к среднему, или же скорость ротора. До проведения вентиляционного расчета условные скорости воздуха на основании опыта можно принять равными:

1. Скорость воздуха у расточки:

а) при радиальной вентиляции

$$v_\delta \approx 0,5v_a, \qquad (59)$$

где

$$v_a = \pi Dn \ \frac{м}{сек};$$

б) при аксиальной вентиляции

$$v_\delta = \sqrt{(0,5v_a)^2 + v_{возд}^2}, \qquad (59а)$$

где $v_{возд}$ — аксиальная скорость воздуха.

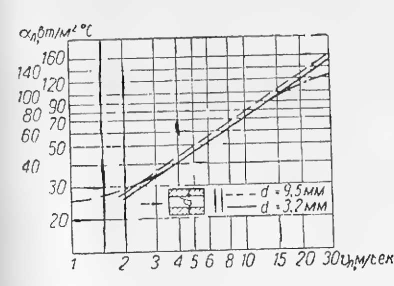



Рис. 61. Коэффициент теплоотдачи лобовых частей.

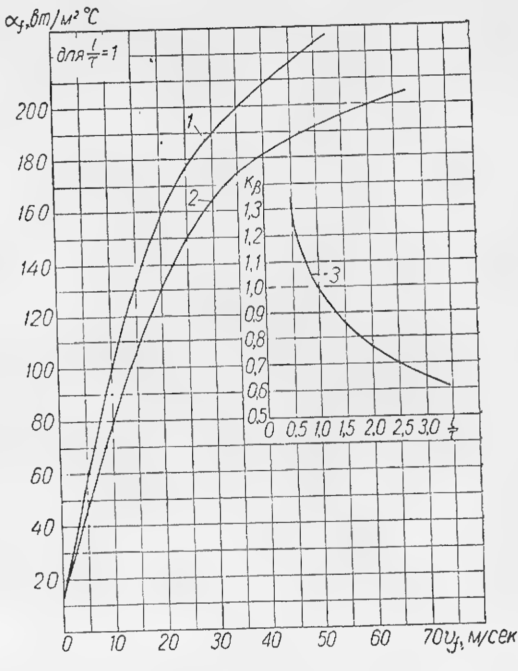



Рис. 62. Коэффициент теплоотдачи однорядных полюсных катушек синхронных машин в функции окружной скорости:

*1* — для аксиальной вентиляции; *2* — для радиальной вентиляции; *3* — поправочный коэффициент, на который нужно умножить $\alpha_f$ при $\frac{l}{\tau} \neq 1$.

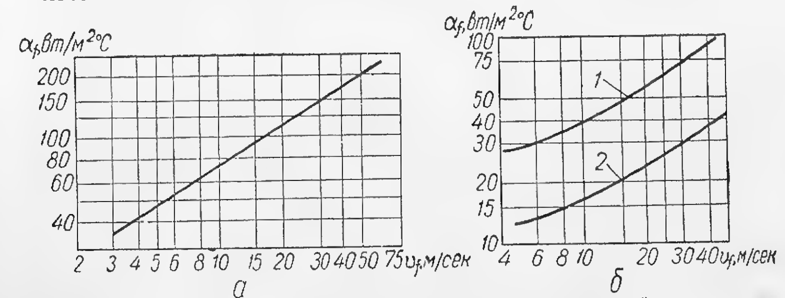


Рис. 63. Коэффициент теплоотдачи в функции окружной скорости:

*а* — однорядных полюсных катушек; *б* — многослойных катушек: 1 — для внутриполюсных машин; 2 — для внешнеполюсных машин.

2. Скорость воздуха у катушек возбуждения:

а) при радиальной вентиляции

$$v_f \approx (0,25 \div 0,45) \qquad (60)$$

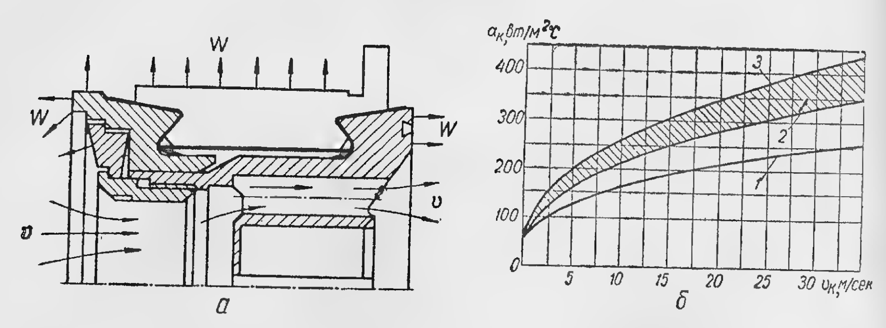
б) при аксиальной вентиляции

$$v_f \approx v_\delta. \tag{60a}$$

3. Скорость воздуха в лобовых частях $v_л$ приближенно можно принять равной $v_f$; при этом в качестве поверхности следует принимать внешнюю обдуваемую поверхность, определяемую по уравнению (102).

4. Скорость воздуха в радиальных вентиляционных каналах вблизи обмотки

$$v'_s = k\frac{V_a}{S'_k}, \tag{61}$$



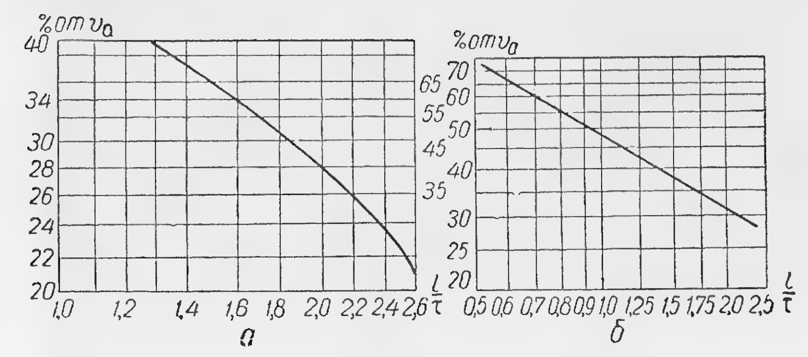




Рис. 64. Схема охлаждения (*а*) и коэффициент теплоотдачи (*б*) коллектора: *1* — без особого охлаждения; *2* и *3* — с особым охлаждением.

где $V_a$ — общий расход воздуха через машину;

$k$ — коэффициент, учитывающий, какая часть общего расхода воздуха проходит через активную часть машины (при отсутствии данных вентиляционного расчета можно принять $k \approx 0{,}6 - 0{,}7$);

$S'_k$ — сечение между стержнями для прохода воздуха.

На основании опыта

$$v'_s \approx k'\sqrt{v_a},$$

где $k' \approx 2$.

Последняя формула может быть использована для ориентировочного определения $v'_s$ для всех машин.

5. Средняя скорость воздуха в радиальных каналах якоря

$$v_s = \frac{kV_a}{S_k}, \tag{61a}$$

где $S_k$ — среднее сечение каналов; при отсутствии данных о расходе и сечении можно принять

$$v_s = k\sqrt{v_a};\ k \approx 1$$

(см. также рис. 65).

6. Условная скорость воздуха у ярма

$$v_j \approx \frac{1}{2} v_s.$$



При аксиальной вентиляции

$$v_s = \frac{V_к}{S_к};\ v_j = \frac{V_j}{S_j},$$

где $V_к$ и $V_j$ — расходы воздуха через каналы.

Уточнение величины скоростей может быть произведено после вентиляционного расчета машины.

Температура и расход охлаждающего воздуха в машине. Для вычисления температуры тела необходимо знать:

а) *перепады* температуры, вычисляемые по формулам (36) и (37),

б) *превышение* температуры охлаждающего воздуха и температуру входящего воздуха.



Рис. 65. Средняя скорость воздуха в процентах от окружной скорости якоря: *а* — в вентиляционных каналах асинхронных машин; *б* — в вентиляционных каналах явно полюсных машин.

Точно знать температуру воздуха у данной поверхности практически невозможно. Однако изменение температуры воздуха в машине не очень велико, и для расчета обыкновенно достаточно знать его среднюю температуру у данной поверхности. Если считать, что воздух при прохождении по вентиляционным каналам машины подогревается на величину $\Delta\theta_a = \overset{\circ}{\theta}_{a\,гор} - \overset{\circ}{\theta}_{a\,хол}$, то средняя температура охлаждающего воздуха в машине будет

$$\overset{\circ}{\theta}_a = \overset{\circ}{\theta}_{a\,хол} + \frac{\Delta\theta_a}{2} = \overset{\circ}{\theta}_{a\,хол} + \frac{\overset{\circ}{\theta}_{a\,гор} - \overset{\circ}{\theta}_{a\,хол}}{2}. \tag{62}$$

Подогрев воздуха $\Delta\theta_a$ зависит от расхода воздуха и величины потерь машины. Среднее превышение $\theta_a = 0{,}5\,\Delta\theta_a$.

Для установившегося режима сумма потерь, уносимых воздухом, равна

$$\Sigma' p = \Delta\theta_a V_a c_p \gamma_a\ квт, \tag{63}$$

где $c_p$ — теплоемкость воздуха $\approx 1$ *кдж/кг° С*;

$\gamma_a$ — удельный вес воздуха

$$\gamma_a = 1{,}29\,\frac{273}{273 + \overset{\circ}{\theta}_a}\cdot p_a;$$

$p_a$ — атмосферное давление, *ата*.

При $\theta_a^0 = 50°$ и $p_a = 1 ата$ $\gamma_a c_p = 1{,}1$,

$$\Delta\theta_a = \frac{\Sigma p}{1{,}1 V_a}. \tag{63а}$$

## 6-4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ И ЖЕЛЕЗА ЯКОРЯ

### Метод полных тепловых проводимостей

Рассмотрим сначала обмотку якоря без учета изменения температуры вдоль машины, приняв обмотку якоря за однородное тело *1*, а железо за однородное тело *2*. Согласно уравнениям (36) и (37) для расчета превышений температур $\theta_1$ и $\theta_2$ над охлаждающей средой достаточно знать три параметра тепловой схемы (рис. 56): $\Lambda_1$, $\Lambda_2$, $\Lambda_{12} \approx \Lambda_{21}$, через которые можно выразить величины $\Lambda_1'$ и $\Lambda_2'$.

Тепловая проводимость от меди якоря к охлаждающему воздуху (рис. 52 и 54) имеет место: а) в вентиляционных каналах, б) в лобовых частях. Кроме того, необходимо учесть, что тепловое сопротивление $R_1 = \frac{1}{\Lambda_1}$ состоит из суммы тепловых сопротивлений изоляции $R_i$ и схода с поверхности $R_\alpha = \frac{1}{\Lambda_\alpha}$:

$$\Lambda_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_i + R_\alpha} = \frac{\Lambda_i \Lambda_\alpha}{\Lambda_i + \Lambda_\alpha} = \Lambda_\alpha \frac{\xi}{1+\xi}; \tag{64}$$

$$\Lambda_\alpha = \alpha_л S_1; \ \Lambda_i = \frac{k_i}{\Delta_i} \cdot S_1, \tag{65}$$

где $\xi$ — отношение удельной тепловой проводимости изоляции $\frac{k_i}{\Delta_i}$ к коэффициенту теплоотдачи;
$\Delta_i$ — односторонняя толщина изоляции в лобовой части;
$k_i$ — коэффициент теплопроводности изоляции;
$\alpha_л$ — средний коэффициент теплоотдачи в лобовых частях;
$S_1$ — поверхность охлаждения меди непосредственно воздухом

$$S_1 = (n_s b_s + l_л k_л')\, Z_1 \Pi; \tag{66}$$

$n_s$, $b_s$ — число и ширина вентиляционных каналов;
$l_л$ — длина лобовой части;
$k_л'$ — коэффициент, учитывающий распорки и бандажи, уменьшающие обдуваемую поверхность, и неравномерность обдува ($k_л' \approx 0{,}8$ для статорных корзиночных обмоток);
$\Pi$ — периметр паза, равный * приблизительно $2(h_п + b_п)$;
$Z_1$ — число пазов.

Тепловая проводимость $\Lambda_2$, как видно из рис. 52 и 54, определяется величиной омываемых воздухом поверхностей активного железа: $S_s$ — каналов, $S_\delta$ — коронок зубцов, $S_j$ — внешней поверхности спинки. Общее количество тепла, отданное этими поверхностями,

$$\theta_{Fe}\Lambda_2 = \theta_{Fe}(\Lambda_\delta + \Lambda_j) + \theta_s \Lambda_s \tag{67}$$

* При значительной высоте клина в качестве $h_п$ следует подставить высоту паза, занятую обмоткой.



или при учете уравнения (15) при $\xi = \xi_s$

$$\theta_{Fe}\Lambda_2 = \theta_{Fe}\left(\Lambda_\delta + \Lambda_j + \Lambda_s \frac{\xi_s}{1+\xi_s}\right), \tag{68}$$

откуда эквивалентная тепловая проводимость

$$\Lambda_2 = \Lambda_\delta + \Lambda_j + \Lambda_s \frac{\xi_s}{1+\xi_s} = \alpha_\delta S_\delta + \alpha_j S_j + \alpha_s' S_s, \tag{69}$$

где

$$\alpha_s' = \alpha_s \frac{\xi_s}{1+\xi_s}.$$

Определение поверхностей каналов $S_s$, расточки $S_\delta$ и ярма $S_j$ — см. рис. 52 и формулы (104) и (105).

Таким образом, при учете теплопроводности поперек листов надо взять вместо $\alpha_s$ величину

$$\alpha_s' = \alpha_s \frac{\xi_s}{1+\xi_s}, \tag{70}$$

где

$$\xi_s = \frac{6k_x}{\alpha_s l'}, \tag{71}$$

$k_x$ — коэффициент теплопроводности поперек листового пакета (табл. 7).

При хорошей прессовке в среднем $k_x \approx 0{,}01$ [98]. При слабой прессовке $k_x$ может сильно уменьшиться, что согласно уравнению (69) может привести к значительному уменьшению проводимости $\Lambda_2$ и к перегреву пакетов.

Взаимная тепловая проводимость $\Lambda_{12}$ здесь равна $\Lambda_{21}$ и равна удельной теплопроводности изоляции, умноженной на поверхность соприкосновения изоляции и железа (рис. 52)

$$\Lambda_{21} = \Lambda_{12} = \frac{k_j}{\Delta_i} S_{12} = \frac{1}{R_i}; \ S_{12} = (n_s + 1)\, l' Z \Pi, \tag{72}$$

где $l'$ и $(n_s + 1)$ — ширина пакета и число пакетов;
$\Pi$ — периметр соприкосновения обмотки с железом.

Определив тепловые проводимости $\Lambda_1$, $\Lambda_2$ и $\Lambda_{12}$, находим превышения температур $\theta_1$ и $\theta_2$ по уравнениям (36) и (37).

Прибавляя к ним средний подогрев воздуха по (62), получаем полные превышения температуры над входящим воздухом, а прибавляя далее температуру входящего воздуха, находим температуру меди (рис. 53).

Учет распределения температуры вдоль обмотки. Допущение постоянства температуры поверхностей тел *1* и *2* и бесконечно большой внутренней теплопроводности является достаточно грубым и в отдельных случаях приводит к большим погрешностям тепловых расчетов. Уточнение может быть сделано, если распределение температуры в теле и на пограничной поверхности учесть особым коэффициентом распределения, найденным из решения уравнения (6), а в качестве превышений температур $\theta$, входящих в формулы (28), подставить некоторые *условные* значения, определенные ниже. Действительные температуры тогда можно выразить через эти найденные условные значения.

Рассматривая, например, якорь электрической машины (рис. 52, в), видим, что обмотка разделяется на две части — уложенную в пазы и лобовую. Условия охлаждения и теплообмена этих частей различны. Поэтому будет правильным рассмотреть эти части в *отдельности*.

Рассматривая железо якоря, можно видеть, что температура по ширине пакета, согласно (9) и рис. 54, распределена в действительности по параболическому закону. По боковой поверхности пакета (в канале) температура изменяется незначительно, так как теплопроводность железа вдоль листов приблизительно в 70 раз больше, чем поперек (табл. 7).

Для нахождения распределения температуры меди рассмотрим уравнение (6) *применительно к пазовой части обмотки* (рис. 52, в).

Пренебрегая изменением температуры по поперечному сечению меди паза и считая $\theta_x$, $\theta_{Fe}$ и $\theta_a$ как *превышения над базовой температурой* *, из уравнения стационарной теплопроводности (6), написанного для объема $S_{Cu} \times 1$ *см*$^3$, получим уравнение теплового баланса для меди

$$-k_{Cu}S_{Cu}\frac{d^2\theta_x}{dx^2} + \frac{1}{l}\left[(\theta_x + \theta_{Fe})\Lambda_{12} + (\theta_x - \theta_a)\Lambda_1\right] = \frac{p_{Cu\,п}}{l}, \qquad (73)$$

где $k_{Cu}$ и $S_{Cu}$ — коэффициент теплопроводности и поперечное сечение меди паза;

$\Lambda_{12} = \Lambda_i$ — тепловая проводимость пазовой изоляции;

$\Lambda_1$ — тепловая проводимость от меди к воздуху на ширине каналов;

$p_{Cu\,п}$ — потери в меди на длине пазовой части.

При составлении уравнения баланса тепловой энергии для железа мы будем пренебрегать величиной передачи тепла в железе в направлении $x$, т. е. величиной $\frac{d^2\theta_{xFe}}{dx^2}$; будем, следовательно, считать, что тепло от железа распространяется только в радиальном направлении. Действительно, аксиальные потоки в железе имеют место только на ширине пакетов. Это обстоятельство не сказывается практически на температуре меди [86].

Таким образом, тепло, выделенное в железе, плюс тепло, переданное от меди, равно теплу, отданному воздуху, т. е.

$$\Lambda_{12}(\theta_x - \theta_{Fe}) + p_{Fe} = (\Lambda_\delta + \Lambda_j)(\theta_{Fe} - \theta_a) + \Lambda_s(\theta_s - \theta_a) = (\Lambda_\delta + \Lambda_j + \Lambda_s')(\theta_{Fe} - \theta_a), \qquad (74)$$

где

$$\Lambda_s' = \Lambda_s\frac{\xi_s}{1 + \xi_s}.$$

Превышение температуры железа над $\theta_{1б}$

$$\theta_{Fe} = \frac{p_{Fe} + \Lambda_{12}\theta_x + \Lambda_2\theta_a}{\Lambda_{12} + \Lambda_2}. \qquad (75)$$

* Удобно принять в качестве $\theta_{1б}^{\circ}$ температуру входящего воздуха.



Подставляя это значение в (73), получаем

$$k_{Cu}S_{Cu}\frac{d^2\theta_x}{dx^2} - \frac{1}{l}\left[\left(\Lambda_1 + \frac{\Lambda_2\Lambda_{12}}{\Lambda_2 + \Lambda_{12}}\right)(\theta_x - \theta_a) - \frac{\Lambda_{12}}{\Lambda_{12} + \Lambda_2}p_{Fe} - p_{Cu\,п}\right] = 0. \qquad (76)$$

Сравнивая (76) с (29) и (34), видим, что

$$\Lambda_1 + \frac{\Lambda_2 \cdot \Lambda_{12}}{\Lambda_2 + \Lambda_{12}} = \Lambda_1' \qquad (77)$$

представляет эквивалентную тепловую проводимость на длине активной части.

Введем далее согласно (36) величины

$$k_{12} = \frac{\Lambda_{12}}{\Lambda_{21} + \Lambda_2} \quad \text{и} \quad \frac{p_{Cu\,п} + k_{12}p_{Fe}}{\Lambda_1'} = \theta_{11к} + \theta_{12о}, \qquad (78)$$

где

$$\theta_{11к} = \frac{p_{Cu\,п}}{\Lambda_1'} \quad \text{и} \quad \theta_{12о} = \frac{k_{12}p_{Fe}}{\Lambda_1'}.$$

Тогда, разделив все члены уравнения (76) на $k_{Cu}S_{Cu}$, получим

$$\frac{d^2\theta_x}{dx^2} - A^2\theta_x = -A^2(\theta_a + \theta_{11к} + \theta_{12о}) = -A^2\theta_1', \qquad (79)$$

где

$$A^2 = \frac{\Lambda_1'}{k_{Cu}S_{Cu}} \cong \frac{s^2\rho'}{\theta_{11к}k_{Cu}}. \qquad (80)$$

Величина

$$\theta_1' = \theta_a + \theta_{11к} + \theta_{12о} \qquad (81)$$

может быть названа условным превышением температуры активной части меди над $\theta_{1б}^{\circ}$ *; $\theta_a$ — превышение средней температуры охлаждающего воздуха в машине над $\theta_{1б}^{\circ}$.

Решение (79), как известно, имеет вид

$$\theta_x = \theta_1' + \theta_{1a}\,\mathrm{ch}\,Ax + \theta_{2a}\,\mathrm{sh}\,Ax, \qquad (82)$$

где $\theta_{1a}$ и $\theta_{2a}$ — постоянные, определяемые из граничных условий.

Как видно, уравнение стационарного нагрева (76) для обмотки по длине $l$ могло быть составлено сразу на основании выводов теории двух тел в виде

$$\Lambda_1'(\theta_x - \theta_a) = p_э + k_{Cu}S_{Cu}\frac{d_2\theta_x}{dx^2}, \qquad (83)$$

где

$$p_э = p_1 + k_{12}p_2; \quad p_1 = p_{Cu\,п}; \quad p_2 = p_{Fe} \qquad (84)$$

— эквивалентные потери в активной части и

$$\Lambda_1' = \Lambda_1 + \frac{\Lambda_{12}\Lambda_2}{\Lambda_{12} + \Lambda_2}$$

— эквивалентная теплоотдача от меди к воздуху.

* Это превышение было бы при отсутствии осевой теплопередачи.

Для лобовой части аналогичным образом баланс энергии будет

$$k_{Cu}S_{Cu}\frac{d^2\theta_x}{dx^2}-\frac{1}{l_л}\left[\Lambda_л(\theta_x-\theta_{aл})-p_л\right]=0 \qquad (85)$$

или

$$\frac{d^2\theta_x}{dx^2}-A_л^2\theta_x=-A_л^2\theta_1'', \qquad (86)$$

где

$$\theta_1''=\theta_{aл}+\frac{p_л}{\Lambda_л}=\theta_{aл}+\theta_{11л}, \qquad (87)$$

$$A_л=\sqrt{\frac{\Lambda_л}{k_{Cu}S_{Cu}l_л}}=\sqrt{\frac{s^2\rho}{k_{Cu}\theta_{11л}}}, \qquad (88)$$

причем $\Lambda_л$ — соответствует формуле (64) на длине $l_л$ (без $n_s b_s$).

Так как в лобовой части (рис. 66, *а*) при $x_л=0$ кривая $\theta_x=f(x)$ имеем минимум, то член с $\operatorname{sh} A_л x_л$ равен нулю, и мы получим

$$\theta_{xл}=\theta_1''+\theta_{1л}\operatorname{ch} A_л x_л. \qquad (89)$$

При симметричном относительно центра машины нагреве кривая $\theta_x=f(x)$ будет иметь максимум при $x=0$ и член с $\operatorname{sh} Ax$ в (82) пропадает. Поэтому остается определить две постоянные $\theta_{1a}$ и $\theta_{1л}$:

1) при $x=l_1=\frac{1}{2}l$ и $x_л=l_2=\frac{1}{2}l_л$

$$\theta_x(l_1)=\theta_{xл}(l_2);$$

2) при тех же значениях $x$ и $x_л$ из закона непрерывности теплового потока

$$\frac{d\theta_x}{dx}=-\frac{d\theta_{xл}}{dx_л}.$$

Эти условия при подстановке в (82) и (89) дают значения постоянных

$$\theta_{1a}=-\frac{1}{\varphi}(\theta_1'-\theta_1''), \qquad (90)$$

$$\theta_{1л}=-\theta_{1a}\cdot k, \qquad (91)$$

где

$$k=\frac{A\operatorname{sh} Al_1}{A_л\operatorname{sh} A_л l_2}; \qquad (92)$$

$\varphi$ — функция длины машины и «постоянных распространения» $A$ и $A_л$

$$\varphi=\operatorname{ch} Al_1+k\operatorname{ch} A_л l_2. \qquad (93)$$

Обыкновенно

$$A\approx A_л\approx 0{,}04\div 0{,}05\,\frac{1}{см}.$$

При $l_1>30$ *см* можно считать

$$\varphi\approx e^{Al_1}\approx e^{(0{,}04\div 0{,}05)l_1}\approx e^{(0{,}02\div 0{,}025)l}. \qquad (94)$$

*Действительное максимальное превышение температуры меди* получаем согласно (82), (89), (90) и (91)

$$\left.\begin{aligned}\theta_x&=\theta_1'-\frac{1}{\varphi}(\theta_1'-\theta_1'')\operatorname{ch} Ax\\ \theta_{xл}&=\theta_1''+\frac{k}{\varphi}(\theta_1'-\theta_1'')\operatorname{ch} A_л x_л\end{aligned}\right\}. \qquad (95)$$



Если $\theta_1'>\theta_1''$, то максимум температуры будет при $x=0$, т. е.

$$\theta_{max}=\theta_1'-\frac{1}{\varphi}(\theta_1'-\theta_1'')=\theta_1'k_0, \qquad (96)$$

где

$$k_0=1-\frac{1}{\varphi}\left(1-\frac{\theta_1''}{\theta_1'}\right) \qquad (96а)$$

может быть назван *коэффициентом осевой теплопередачи*. При равенстве условных температур активной и лобовой части, т. е. при $\theta_1'=\theta_1''$, условная температура равна действительной. При $l_1>60$ *см* можно считать $k_0\approx 1$.

При $\theta_1'<\theta_1''$, что встречается весьма редко, в машинах с плохо охлаждаемыми лобовыми частями (например закрытых бандажами) $k_0>1$, температура в центре машины больше условной и

$$\theta_{max}=\theta_1''-\frac{k}{\varphi}(\theta_1''-\theta_1')$$

будет при $x_л=0$, т. е. в конце лобовой части.

*Среднее превышение температуры, соответствующее измеряемому по повышению сопротивления*, получится интегрированием уравнений (95)

$$\theta_{ср}=\frac{l}{l+l_л}\left(\theta_1'+\theta_{1a}\frac{\operatorname{sh} 0{,}5Al}{0{,}5Al}\right)+$$

$$+\frac{l_л}{l+l_л}\left(\theta_1''+\theta_{1л}\frac{\operatorname{sh} 0{,}5A_л l_л}{0{,}5A_л l_л}\right)\approx\frac{\theta_1' l+\theta_1'' l_л}{l+l_л}. \qquad (97)$$

Как видно из уравнений (96) — (97), максимальное и среднее превышения температуры находятся через условные превышения $\theta_1'$ и $\theta_1''$ в пазовой и лобовой части (рис. 66, *а*). Условные превышения определяются в соответствии с уравнениями (36), (37), (87)

$$\theta_1'=\frac{p_1+k_{12}p_2}{\Lambda_1'}+\theta_a;\quad \theta_1''=\frac{p_л}{\Lambda_л}+\theta_{aл}, \qquad (98)$$

где

$$\Lambda_1'=\Lambda_1+\frac{\Lambda_{12}\Lambda_2}{\Lambda_{12}+\Lambda_2}\ \text{и}\ \Lambda_л=\Lambda_{aл}\left(\frac{\xi}{1+\xi_л}\right)=\alpha_л S_л\frac{\xi_л}{1+\xi_л} \qquad (99)$$

представляют результирующие тепловые проводимости в активной и лобовой части, а $\Lambda_{aл}$ соответствует проводимости теплосъема с поверхности лобовых частей.

Величина

$$\xi_л=\frac{k_{iл}}{\Delta_{iл}\alpha_л} \qquad (100)$$

равна отношению удельной тепловой проводимости изоляции лобовых частей $\left(\frac{k_{iл}}{\Delta_{iл}}\approx\frac{k_i}{\Delta_i}\right)$ к коэффициенту теплоотдачи.

Величины $\Lambda_1$, $\Lambda_2$ и $\Lambda_{12}$ могут быть написаны через поверхности и коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности. Если ввести тепловую проводимость теплосъема в каналах $\Lambda_{av}=S_v\alpha_v$, то получим

$$\Lambda_1=\Lambda_{av}\left(\frac{\xi_v}{1+\xi_v}\right), \qquad (101)$$

где

$$\xi_v = \frac{k_i}{\Delta_i \alpha_v},$$

$\alpha_v \approx \alpha_л$* по уравнению (56).

В (99) и (101) обозначено:

$S_л$ — обдуваемая поверхность лобовых частей;

$S_v$ — обдуваемая поверхность обмотки в каналах, причем

$$\left.\begin{aligned} S_л &\approx l_л Z k'_л \Pi \\ S_v &\approx n_s b_s Z \Pi \end{aligned}\right\}, \qquad (102)$$

где $k'_л$ — коэффициент обдуваемости лобовых частей, определяемый ниже;

$\Pi$ — периметр паза;

$Z$ — число пазов.

Тепловая проводимость изоляции на активной длине

$$\Lambda_{12} = \Lambda_i = \frac{k_i}{\Delta_i} S_i = \frac{2k_i}{\Delta_i}(n_s + 1)\, l' \cdot (h_п + b_п)\, Z. \qquad (103)$$

Тепловая проводимость от железа к воздуху по (69)

$$\Lambda_2 = \alpha_\delta \pi D l_{Fe} \cdot \frac{b_2}{t_1} + \alpha_j \pi D_j l_{Fe} + \alpha'_s S_s, \qquad (104)$$

где $\alpha'_s$ по (70).

Обдуваемая поверхность радиальных каналов

$$S_s = 2\left[\frac{\pi}{4}(D_j^2 - D^2) - h_п b_п Z\right](n_s + 1). \qquad (105)$$

Учет изменения сопротивления с температурой. В уравнениях (73) и (76) потери в меди $p_{Cu}$ и соответствующие им величины $\frac{p_{Cu}}{\Lambda'_1} = \theta_{11к}$ входят в общем виде. Если ввести зависимость потерь в меди от температуры

$$p_{Cu} = p_{Cu1}(1 + \alpha_1 \theta), \qquad (106)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{1}{235 + \theta^0_{б1}}$$

и $p_{Cu1}$ — потери в меди при базисной температуре $\theta^0_{б1}$, то получим превышения $\theta$ над температурой $\theta^0_{б1}$; удобно в качестве $\theta^0_{б1}$ принять температуру входящего воздуха.

Подставляя (106) в (81) и (87) при определении $\theta_{11к}$, получим уравнения для условных *превышений* температуры в активной и лобовой части в виде

$$\theta'_1 = \frac{1}{1 - \beta}(\theta_{a1} + \theta'_{11к} + \theta_{12o}); \qquad (107)$$

$$\theta''_1 = \frac{1}{1 - \beta_л}(\theta_{aл1} + \theta'_{11л}). \qquad (108)$$

Здесь

$$\left.\begin{aligned} \beta &= \frac{\theta'_{11к}}{235 + \theta_{б1}}; \quad \beta_л = \frac{\theta'_{11л}}{235 + \theta_{б1}} \\ \theta'_{11к} &= \frac{p_{Cu1}}{\Lambda'_1}; \quad \theta'_{11л} = \frac{p_{л1}}{\Lambda_л} \end{aligned}\right\}. \qquad (109)$$

$\theta_{a1}$ и $\theta_{aл1}$ равны $\theta_a$ и $\theta_{aл}$ при $p_{Cu} = p_{Cu\,1}$.

* При точных расчетах надо учесть различные скорости воздуха.



Упрощенный метод расчета распределения температуры.

Расчет распределения температуры по приведенному выше методу удобен в том случае, когда разница теплоотдачи на участках активной и лобовой части отличается незначительно (например, когда $\theta'_1$ и $\theta''_1$ отличается не больше чем в 2—3 раза).

В тех случаях, когда отдельные участки по длине машины имеют затрудненную теплоотдачу (например, когда лобовые части закрыты бандажами) или когда желательно применить более простой приближенный метод, целесообразно сначала определить среднее превышение температуры внешней поверхности изоляции над охлаждающей средой

$$\theta_{ср} = \frac{p_{Cu} + p_{Fe}}{\Lambda_2 + \Lambda_\alpha} + \frac{p_{Cu\,п}}{\Lambda_{12}} + \Delta\theta_{Fe} + \theta_a, \qquad (110)$$

где $\Lambda_2$ — для радиальной вентиляции по (69); для аксиальной по (111); $\Lambda_{12} = \Lambda_i$; $\Lambda_\alpha$ по (65), (66); $\Delta\theta_{Fe}$ — для аксиальной вентиляции по (11), при этом в качестве $l'$ необходимо подставить удвоенную высоту зубцов, а в качестве $k_x$ — теплопроводность железа вдоль листов (табл. 7). При радиальной вентиляции $\Delta\theta_{Fe} = 0$.

В случае пренебрежимо малой теплопроводности через изоляцию в радиальном направлении на некотором участке длиной $l_x$ можно при определении $\theta_{ср}$ положить проводимость $\Lambda_x$ данного участка равной нулю.

Максимальное превышение при этом можно приближенно определить по уравнению (12), принимая параболическое распределение температуры на участке длиной $l_x$

$$\theta_{max} = \theta_1 + \frac{p'_{ox}}{8k_{Cu}} l_x^2, \qquad (110\,а)$$

где

$\theta_1$ равно $\theta_{ср}$ по (110), но при $p_{Cu}$, уменьшенном в отношении $\left(1 - \frac{2l_x}{l_w}\right)$,

$$p'_{ox} = s^2 \rho \; вт/см^3; \; k_{Cu} = 3{,}75 \; вт/см\,°\,C.$$

Например, для случая полностью закрытых лобовых частей $l_x = 2l_л$ в (110) надо положить $\Lambda_x = \Lambda_\alpha = 0$ и при $s = 500\ а/см^2$, $l_л = 50\ см$

$$\frac{p'_{ox} l_x^2}{8k_x} = \frac{500^2 \cdot 1{,}75 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 3{,}7} 100^2 = 150°\,C; \; \theta_{max} = \theta_1 + 150°\,C.$$

Если теплоотдача на участке $l_x$ хотя и мала, но не равна нулю, можно также определить $\theta_{max}$ по (110а), если ввести эффективное значение удельных потерь, передаваемых вдоль обмотки

$$p'_{ox} = s^2 \rho \frac{\Lambda_{Cu}}{\Lambda_{Cu} + \Lambda_x},$$

где

$$\Lambda_{Cu} = \frac{k_{Cu} S_{Cu}}{l_x};$$

$S_{Cu}$ — сечение меди пазов;

$\Lambda_x$ — проводимость от меди к воздуху на участке $l_x$ [для лобовой части $\Lambda_x = \Lambda_\alpha$ по (65)].

## Расчет температуры при аксиальной вентиляции и несимметричном нагреве

При аксиальной вентиляции распределение температуры вдоль машины соответствует рис. 49,*б* [98]. Решение уравнений нагрева для этого случая дано в [98], [86]. Однако с достаточной

точностью можно получить кривую распределения температуры при аксиальной системе вентиляции путем поворота кривой, рассчитанной для случая симметричного нагрева (рис. 66), на угол $\alpha$, определяемый отношением $\frac{\theta_{a(\text{гор})} - \theta_{a(\text{хол})}}{l}$. Построение показано на рис. 66, *в*.

Симметричный нагрев можно рассчитывать по отношению к средней температуре охлаждающего воздуха $\theta_a$. Условные превышения $\theta_1'$ и $\theta_1''$ можно подсчитывать по формулам (98). При этом проводимости будут равны

$$\Lambda_1 = 0;$$

в случае вентилируемого зазора и спинки

$$\Lambda_2 = \alpha_\delta \pi D l_{\text{Fe}} \frac{b_z}{t_1} + \alpha_j \pi D_j l_{\text{Fe}} + \alpha_s' S_s + \alpha_\text{к} n_v d_v \pi l_v, \qquad (111)$$

где $n_v$, $d_v$, $l_v$ — число, диаметр и длина аксиальных каналов.

При вычислении $S_s$ по (105) необходимо положить $n_s = 0$, а при вычислении $\xi_s$ надо вместо длины пакета $l'$ подставить полную длину железа $l_{\text{Fe}}$.

При вычислении $\Lambda_{12} = \Lambda_i$ также надо положить $l' = l_{\text{Fe}}$ и $n_s = 0$; $\Lambda_л$ вычисляют по (99).

В случае несимметричного нагрева (рис. 66, *б*) кривая нагрева может быть построена путем графического перехода (пунктир) от одной половины, построенной, как для симметричного нагрева, к другой. Если имеются участки с малой теплоотдачей, на которых условные температуры могут получиться очень большими, следует исключить эти участки и определять среднюю и максимальную температуру по (110) и (110а).

Рис. 66. Распределение температуры в меди обмотки:

*а* — при симметричном нагреве; *б* — при несимметричном нагреве; *в* — при аксиальной вентиляции.

### Расчет температур по удельным нагрузкам и по удельным проводимостям

Вычисление превышений температур по (36), (37) и (81) — (87) требует расчета проводимости $\Lambda_1$, $\Lambda_{12}$, $\Lambda_л$ и $\Lambda_2$ по (64) — (72) и соответствующих потерь $p_1 = p_{\text{Cu}}$ и $p_2 = p_{\text{Fe}}$. Практически весьма



удобно потери и проводимости относить к поверхности расточки $\pi D l$, т. е. вместо уравнений (98) писать

$$\theta_1' = \frac{w_п + k_{12} w_{\text{Fe}}}{\alpha_1'} + \theta_a$$

и (112)

$$\theta_1'' = \frac{w_л}{\alpha_л'} + \theta_a,$$

где $\alpha_1' = \frac{\Lambda_1'}{\pi D l}$ и $\alpha_л' = \frac{\Lambda_л'}{\pi D l_л}$ — удельные проводимости в активной и лобовой части;

$$w_п = \frac{p_{\text{Cu п}}}{\pi D l} = sA\rho'\,^*; \quad w_{\text{Fe}} = \frac{p_{\text{Fe}}}{\pi D l}; \quad w_л = \frac{p_л}{\pi D l_л} = sA\rho_л' = w_{\text{Cu}} \qquad (113)$$

называются удельными приведенными тепловыми нагрузками и представляют потери в меди пазов, в железе якоря и в меди лобовой части, отнесенные к $\pi D l$; $A$ — линейная нагрузка; $s$ — плотность тока, $a/см^2$.

Вычисление $\alpha_1'$ и $\alpha_л'$ значительно проще, чем вычисление величин $\Lambda_1'$ и $\Lambda_л'$. Произведя деление на $\pi D l$ уравнений для $\Lambda_1'$ и $\Lambda_л'$, получаем:

$$1)\ \alpha_1 = \frac{\Lambda_1}{\pi D l} = \alpha_v \frac{\xi_v}{1 + \xi_v} k_{sv}, \qquad (114)$$

где $k_{sv} = \frac{S_v'}{\pi D l} = \frac{\text{обдуваемая поверхность обмотки в каналах}}{\pi D l}$,

$$k_{sv} = \frac{n_s b_s}{l t_1} П; \qquad (115)$$

$\xi_v = \frac{k_i}{\Delta_i \alpha_v}$; $\alpha_v \approx \alpha_л$ — коэффициент теплоотдачи обмотки в каналах;

$$2)\ \alpha_{12} = \alpha_i = \frac{\Lambda_{12}}{\pi D l} = \frac{k_i}{\Delta_i} \frac{S_{12}}{\pi D l} = \frac{k_i}{\Delta_i} k_{sп}, \qquad (116)$$

где

$$k_{sп} = \frac{l_{\text{Fe}}}{l} \frac{П}{t_1} \qquad (117)$$

(см. рис. 52);

$$3)\ \alpha_2 = \gamma_{\text{Fe}} = \frac{\Lambda_2}{\pi D l} = \frac{l_{\text{Fe}}}{l} \left[ \alpha_\delta \frac{b_{z1}}{t_1} + \alpha_j \frac{D_j}{D} + \alpha_s' k_{ss} \right], \qquad (118)$$

где $k_{ss} = \frac{S_s}{\pi D l} = \frac{\text{обдуваемая поверхность каналов якоря}}{\pi D l}$.

Согласно формуле (105) и рис. 52

$$k_{ss} = \frac{1}{l'} \left[ 0{,}5\,(D_j - D) \left(1 + \frac{D_j}{D}\right) - \frac{2 h_п b_п}{t_1} \right] \approx \frac{(0{,}6 \div 0{,}7)\,\tau}{l'}. \qquad (119)$$

(При внутренних якорях $D_j < D$ и надо брать вместо $D_j - D$ величину $D - D_j$.)

* $\rho' = \rho k_r$, см. § 5-3.

Удельная теплоотдача в лсбовых частях $\alpha'_{1л}$ согласно (98) равна

$$\alpha'_л = \frac{\Lambda'_л}{\pi D l_л} = \alpha_л \frac{\xi_л}{1+\xi_л} \frac{\Pi k'_л}{t_1}, \qquad (120)$$

где

$$\xi_л = \frac{k_{iл}}{\Delta_{iл}\alpha_л} \text{ или } \frac{1}{\alpha'_л} = \left(\frac{1}{\alpha_л} + \frac{\Delta_i}{k_i}\right)\frac{t_1}{\Pi k'_л}. \qquad (121)$$

$$\theta''_1 = \frac{w_{Cu}}{\alpha'_л} + \theta_a = w_{Cu} \frac{t_1}{\Pi k'_л}\left[\frac{1}{\alpha_л} + \frac{\Delta_i}{k_i}\right] + \theta_{aл}. \qquad (122)$$

Превышения температуры охлаждающего воздуха в активной и лобовой части (63)

$$\theta_a = \frac{1}{2}\frac{\Sigma' p}{1{,}1 V_a} \approx \theta_{aл}. \qquad (123)$$

В формуле (122) коэффициент обдуваемости $k'_л$ лобовой части учитывает ряд особых факторов, как, например: наличие бандажей, закрывающих часть поверхности, наличие распорок, характер конструкции лобовых частей, распределение скоростей воздуха в лобовых частях и т. п. Величина $k'_л$ может быть получена из расчета, но наиболее надежным является ее определение для разных типов машин из опыта. Это является задачей дальнейших работ в области уточнения методов расчета. Ориентировочно для корзиночной обмотки без бандажей $k'_л \approx 1 \div 0{,}7$.

Окончательно получим точные и удобные формулы для расчета температуры

$$\theta'_1 = \frac{sA\rho' + k_{12} w_{Fe}}{\alpha_1 + k_{12}\alpha_{Fe}} + \theta_a, \qquad (124)$$

где

$$k_{12} = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_{Fe}}; \quad sA\rho' = w_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{\frac{1}{2} l_w \pi D}.$$

$$\theta''_1 = \frac{w_{Cu} t_1}{\Pi k'_л}\left[\frac{1}{\alpha_л} + \frac{\Delta_i}{k_i}\right] + \theta_a \qquad (125)$$

и

$$\theta_{Cu\,max} = \theta'_1 - \frac{\theta'_1 - \theta''_1}{\varphi} \approx \theta'_1 - (\theta'_1 - \theta''_1)\, e^{-0{,}06\frac{l}{2}}, \qquad (126)$$

$$\theta_{Cu\ ср} = \frac{\theta'_1 l + \theta''_1 l_л}{l + l_л}. \qquad (127)$$

Если пренебречь теплоотдачей от обмотки на длине каналов $\alpha_1$, то получим еще более простую формулу для $\theta'_1$

$$\theta'_1 = w_{Cu}\left(\frac{1}{\alpha_{Fe}} + \frac{1}{\alpha_i}\right) + \frac{w_{Fe}}{\alpha_{Fe}} + \theta_a. \qquad (128)$$

При *аксиальной системе вентиляции* полученные формулы остаются справедливыми. Надо только в соответствии с рис. 66, *в* рассчитать разные превышения температуры воздуха в лобовых частях



со стороны входа и выхода воздуха $\theta_{aл1}$ и $\theta_{aл2}$, а также определить величину $k_{ss}$ в формуле для $\alpha_{Fe}$ как

$$k_{ss} = \frac{S_{sa}}{\pi D l} = \frac{\text{обдуваемая поверхность аксиальных каналов}}{\pi D l}$$

и для $\alpha_s$ подставить значение его для аксиальных каналов по (53а). Превышение температуры железа

$$\theta_2 = \frac{w_{Fe} + k_{21} w_{Cu}}{\alpha'_2} + \theta_a, \qquad (129)$$

где

$$\alpha'_2 = \frac{\Lambda'_2}{\pi D l} = \alpha_2 + \frac{\alpha_{21}\alpha_1}{\alpha_{21} + \alpha_1} = \alpha_2 + k_{21}\alpha_1;$$

$$\alpha_{21} = \alpha_{12} = \alpha_i; \quad \alpha_2 = \alpha_{Fe}.$$

В соответствии с (30)

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_1} = k_{21}. \qquad (130)$$

Анализ формулы (118) и опытные данные показывают, что можно приближенно считать $\alpha_{Fe}$ по формуле

$$\alpha_{Fe} = k\tau \frac{6}{l'}\ вт/см^2{}^\circ C, \qquad (131)$$

где $k = (7 \div 9) \cdot 10^{-4}$ (для машин с радиальными каналами и внешним якорем), или

$$\alpha_{Fe} \approx \alpha_0 (1 + k\sqrt{v_s}) \cdot k_{ss},$$

где

$$\alpha_0 = (16 \div 20)\, 10^{-4}\ вт/см^2\,{}^\circ C; \quad k \approx 1 \div 1{,}4.$$

Согласно данным завода «Электросила»

$$\alpha_{Fe} = \alpha'_{Fe}(1 + 0{,}1 v_a), \qquad (132)$$

где $\alpha'_{Fe}$ вводится с учетом влияния длины машины:

при $\frac{l}{\tau} \leq 2$ $\quad \alpha'_{Fe} = \frac{1}{125} = 0{,}008$,

» $2 < \frac{l}{\tau} < 4$ $\quad \alpha'_{Fe} = \frac{1}{150} = 0{,}00665$,

» $4 < \frac{l}{\tau} < 5$ $\quad \alpha'_{Fe} = \frac{1}{175} = 0{,}0052$.

Эта формула обладает тем недостатком, что не учитывает особенностей конструкции данной машины (ширина пакета, скорость воздуха в каналах и пр.).

По нашему методу учет длины машины должен быть осуществлен: а) умножением $\theta'_1$ на $k_0$ по (96а) и б) учетом уменьшения $\alpha_s$, $\alpha_\delta$, $\alpha_j$ в формулах для $\alpha_{Fe}$ за счет уменьшения средней скорости воздуха в длинных машинах, в) учетом различной величины подогрева воздуха в длинных и коротких машинах.

## 6-5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЗАКРЫТЫХ МАШИН С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Закрытые машины строят с обдуваемым или необдуваемым корпусом, гладким или ребристым. Потери, выделяющиеся в меди и железе статора, частично передаются охлаждаемому корпусу (оболочке) путем теплопроводности, а частично снимаются внутренним циркулирующим воздухом. Циркулирующий внутри воздух отнимает тепло от поверхностей активного железа и обмоток и передает его стенкам оболочки. Потери, выделяющиеся в роторе, также посредством циркулирующего внутри воздуха отдаются стенкам оболочки. Кроме того, часть потерь ротора передается через воздушный зазор в статор и через вал и подшипники — корпусу машины (рис. 67).

Суммарные потери машины в конечном счете снимаются с боковой поверхности корпуса $S_{п1}$ и со щитов $S_{п2}$.

*Перегрев корпуса* над охлаждающим воздухом равен

$$\theta_п = \frac{\varepsilon \sum p}{\alpha_{п1} S_{п1} + \alpha_{п2} S_{п2}}, \quad (133)$$

где $\sum p$ — суммарные потери в статоре и роторе;

$\varepsilon$ — величина ПВ в долях единицы в случае повторно-кратковременного режима;

$\alpha_{п1}$ и $\alpha_{п2}$ — коэффициенты теплоотдачи. Для $\theta_п > 25°$ С

$$\alpha_{п1} \approx \alpha_0 (1 + 0{,}5 \sqrt{v_п}) \left(\frac{\theta_п}{25}\right)^{1/8}; \quad (134)$$

$$\alpha_{п2} \approx \alpha_0 \left(\frac{\theta_п}{25}\right)^{1/8};$$

где

$$\alpha_0 \approx 14 \cdot 10^{-4} \ вт/см^2 °С$$

(принимается, что скорость воздуха у щитов $v_п \approx 0$).

Рис. 67. К расчету нагрева закрытого двигателя:

*а* — структурная схема закрытого двигателя как системы двух тел; *б* — эквивалентная тепловая схема; *в* — определение средней температуры первого тела и средней расчетной температуры.

Средняя скорость обдувания $v_п$ для интенсивно вентилируемых машин выбирается в пределах 10—15 *м/сек*.

При наличии направляющего кожуха на расстоянии $b_к$ от корпуса

$$v_п = \frac{V_a}{\pi (D_п + b_к) b_к}, \quad (135)$$

где $V_a$ — расход воздуха, $м^3/сек$; $D_п$ и $b_к$ в *м*.

Приближенно при остановке машины во время паузы

$$V_a \approx \varepsilon 0{,}25 v_v \pi D_v b_v \frac{\eta}{\eta_{max}}$$

и

$$v_п \approx 0{,}25 \frac{b_v}{b_к} v_v \varepsilon \frac{\eta}{\eta_{max}}, \quad (136)$$



где $\frac{\eta}{\eta_{max}}$ — отношение к. п. д. вентилятора к его максимальному значению (при $v_v < 30 \div 40$ *м/сек* и правильно выбранных вентиляторах $\eta/\eta_{max} \approx 1$, при $v_v > 40$ *м/сек* $\eta/\eta_{max} \approx 0{,}75$);

$v_v, D_v, b_v$ — окружная скорость, диаметр и эффективная ширина лопатки вентилятора.

При постоянной скорости вращения вентилятора во время паузы или при независимой подаче охлаждающего воздуха в (136) $\varepsilon = 1$; при переменной скорости во время цикла $\varepsilon$ равно отношению средней скорости к номинальной ($\varepsilon'$).

Для определения $\alpha_п$ по формуле (134) можно поступать двояко: 1) подставить ожидаемое превышение $\theta_п$ и затем после расчета ввести поправку, 2) подставить (134) в (133), после чего получается

$$\theta_п = \left(\frac{2{,}92 \varepsilon \sum p}{S_{п1} \alpha_0 (1 + 0{,}5 \sqrt{v_п \varepsilon'}) + S_{п2} \alpha_0}\right)^{8/9}. \quad (137)$$

Необходимо иметь в виду, что величина $\alpha_0$ зависит от длины машины, характера обдуваемой поверхности (покрытие лаком, цвет лака и пр.). Поэтому при точных расчетах необходимо ориентироваться на опытные данные.

Условная внешняя поверхность

$$S_{п1} = \pi D_п l_п k_{п1}; \quad S_{п2} = \frac{\pi D_п^2}{2} k_{п2},$$

где $l_п \approx l + \tau$, $D_п \approx D_j$;

$k_{п1}$ — коэффициент увеличения поверхности, зависящий от ее характера. При гладкой поверхности $k_{п1} = 1$, при ребристой поверхности

$$k_{п1} \approx 1 + \left[\frac{2h_р}{t_р}\left(1 - \frac{0{,}5}{1 + 0{,}5 \sqrt{v_п \varepsilon'}}\right)\right] k_р; \quad k_{п2} \approx 1, \quad (138)$$

где $h_р$ и $t_р$ — высота и шаг ребра. Коэффициент $1 - \frac{0{,}5}{1 + 0{,}5 \sqrt{v_п \varepsilon'}}$ учитывает отсутствие излучения с боковых поверхностей ребер. Коэффициент $k_р$ учитывает тот факт, что не вся внешняя поверхность ребриста (обычно $k_р \approx 0{,}7 \div 0{,}8$). В зависимости от конструкции ребер $1{,}5 < k_{п1} < 4$. Необходимо иметь в виду, что увеличение высоты ребер $h_р$ и уменьшение шага $t_р$ с целью увеличения теплоотдачи целесообразно только в определенных границах. Обычно выбирают $\frac{h_р}{t_р}$ не выше $1 \div 2$.

Для определения *превышений температуры* обмоток и железа над охлаждающим воздухом необходимо составить тепловую схему в соответствии с теорией нагрева двух или трех тел. Ниже показано, что можно получить достаточную точность, если принять в качестве первого тела зубцовую зону статора вместе с обмоткой, а в качестве второго тела — ротор вместе с обмоткой. Если обозначить средние превышения температуры поверхностей этих тел $\theta_1$ и $\theta_2$ над средним превышением температуры корпуса, то уравнение теплового баланса для внутреннего воздуха будет

$$\theta_{ai} \Lambda_{ап} = (\theta_1 - \theta_{ai}) \Lambda_{л1} + (\theta_2 - \theta_{ai}) \Lambda_{л2}, \quad (139)$$

где $\Lambda_{л1}$ и $\Lambda_{л2}$ — полные тепловые проводимости от лобовых и торцовых частей статора и ротора, а при наличии каналов также и от их поверхностей.

Превышение температуры внутреннего воздуха над температурой корпуса из (139)

$$\theta_{ai} = \frac{\theta_1 \Lambda_{л1} + \theta_2 \Lambda_{л2}}{\Lambda_{л1} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{ап}}. \quad (139а)$$

В качестве взаимного теплового сопротивления принимаем сопротивление зазора

$$R_{12} = \frac{1}{\Lambda_{12}}.$$

Спинку статора (ярмо) целесообразно рассматривать как тепловое сопротивление вместе с тепловым сопротивлением контакта между спинкой и корпусом. При этом в соответствии с рис. 67

$$R_{\Delta 1} = R'_{\Delta 1} + R''_{\Delta 1},$$

где $R'_{\Delta 1} = \frac{1}{\Lambda_{\Delta 1}}$ — сопротивление контакта;

$R''_{\Delta 1}$ — сопротивление спинки.

Температурный перепад от распределенных источников тепла в зубцах и в спинке $\Delta\theta_{Fe}$ и перепад в изоляции обмоток $\theta_i$ целесообразно учесть отдельно.

Аналогично для ротора: $R'_{\Delta 2}$ — тепловое сопротивление контакта между валом и сердечником и $R''_{\Delta 2}$ — сопротивление сердечника. Уравнения теплового баланса примут вид

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon p_1 &= (\theta_1 - \theta_2)\,\Lambda_{12} + \theta_1\Lambda_{\Delta 1} + (\theta_1 - \theta_{ai})\,\Lambda_{л1} \\ \varepsilon p_2 &= (\theta_2 - \theta_1)\,\Lambda_{12} + \theta_2\Lambda_{\Delta 2} + (\theta_2 - \theta_{ai})\,\Lambda_{л2} \end{aligned}\right\}. \qquad (140)$$

Подставляя из (139а) значение $\theta_{ai}$, получаем

$$\left.\begin{aligned} \theta_1\Lambda_{11} - \theta_2(\Lambda_{12} + \Delta\Lambda) &= \varepsilon p_1 \\ -\theta_1(\Lambda_{12} + \Delta\Lambda) + \theta_2\Lambda_{22} &= \varepsilon p_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (141)$$

где

$$\Lambda_{11} = \Lambda_{12} + \Lambda_{\Delta 1} + \varkappa_1\Lambda_{л1};\quad \Lambda_{22} = \Lambda_{12} + \Lambda_{\Delta 2} + \varkappa_2\Lambda_{л2};$$

$$\varkappa_1 = 1 - \frac{\Lambda_{л1}}{\Lambda_{л1} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{ап}};\quad \varkappa_2 = 1 - \frac{\Lambda_{л2}}{\Lambda_{л1} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{ап}};\quad \Delta\Lambda = \frac{\Lambda_{л1}\Lambda_{л2}}{\Lambda_{л1} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{ап}}.$$

(Расчеты показывают, что можно принять $\varkappa_1 \approx \varkappa_2 \approx 0{,}7$.) Решая систему (140), получаем

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\varepsilon(p_1 + k_{12}p_2)}{\Lambda_{11} - k_{12}(\Lambda_{12} + \Delta\Lambda)} \\ \theta_2 &= \frac{\varepsilon(p_2 + k_{21}p_1)}{\Lambda_{22} - k_{21}(\Lambda_{12} + \Delta\Lambda)} \end{aligned}\right\}, \qquad (142)$$

где

$$k_{12} = \frac{\Lambda_{12} + \Delta\Lambda}{\Lambda_{22}};\quad k_{21} = \frac{\Lambda_{12} + \Delta\Lambda}{\Lambda_{11}}.$$

Превышение температуры обмоток статора и ротора (рис. 67, *в*)

$$\left.\begin{aligned} \theta_{Cu_1} &= \theta_п + \theta_1 + \theta_{i1} + \Delta\theta_{Fe_1} + \theta_{a_в} \\ \theta_{Cu_2} &= \theta_п + \theta_2 + \theta_{i2} + \Delta\theta_{Fe_2} + \theta_{a_в} \end{aligned}\right\}, \qquad (143)$$

где $\theta_{a_в}$ — средний подогрев внешнего охлаждающего воздуха. (Обычно $\theta_{a_в} \approx 3°$ С).

Превышения температуры железа будут меньше на величины перепадов в изоляции $\theta_{i1}$ и $\theta_{i2}$.

Расчет тепловых проводимостей.

1. Проводимость воздушного зазора $\Lambda_{12}$ является сложной функцией числа Рейнольдса, критерия Нуссельта и величины зазора $\delta$ [18]. Однако, можно показать, что $\Lambda_\delta \approx \Lambda_{12}$ и практически мало зависит от величины зазора, а определяется в основном окружной скоростью ротора

$$\Lambda_{12} = \pi D l \alpha_\delta, \qquad (144)$$

где

$$\alpha_\delta \approx 14 \cdot 10^{-4}\,(1 + \sqrt{0{,}5\,v})\ вт/см^2\,°C; \qquad (144а)$$

$v$ — окружная скорость ротора, *м/сек*.



2. Проводимость $\Lambda_{\Delta 1}$ определяется, как обратная величина суммы тепловых сопротивлений стали $R''_{\Delta 1}$ и контакта $R'_{\Delta 1}$

$$\Lambda_{\Delta 1} = \frac{1}{R'_{\Delta 1} + R''_{\Delta 1}}, \qquad (145)$$

где

$$R''_{\Delta 1} \approx \frac{h_j}{k_{Fe}}\,\frac{1}{\pi D_п l}; \qquad (146)$$

$$R'_{\Delta 1} = \frac{1}{\pi D_п l}\,\frac{\Delta}{k_i}; \qquad (147)$$

$h_j$ — высота ярма;

$k_{Fe}$ — коэффициент теплопроводности стали вдоль листов (табл. 7);

$\Delta$ — диаметральный зазор; зависит от диаметра, допусков и посадок. По [1] можно принять для плотной посадки в пределах $0{,}002 \div 0{,}015$ *см*. В среднем $\Delta \approx 0{,}0075$ *см*;

$k_i$ — теплопроводность воздуха в тонких слоях вдоль листов (табл. 7).

Получаем

$$\Lambda_{\Delta 1} = \frac{1}{R'_{\Delta 1} + R''_{\Delta 1}} = \pi D_п l \alpha_{\Delta 1}, \qquad (145а)$$

где

$$\alpha_{\Delta 1} = \frac{\dfrac{k_i}{\Delta}\,\dfrac{k_{Fe}}{h_j}}{\dfrac{k_i}{\Delta} + \dfrac{k_{Fe}}{h_j}}.$$

3. Для ротора при отсутствии осевых каналов можно пренебречь тепловым сопротивлением спинки и сопротивлением между валом и ротором и считаться только с теплоотдачей вдоль вала, т. е.

$$\Lambda_{\Delta 2} \approx \frac{\pi d_в^2}{4}\,\frac{2k_{Fe}}{l'_в - l} = \frac{\pi d_в^2}{4}\,\alpha_{\Delta 2}.$$

Здесь

$$\alpha_{\Delta 2} = \frac{2k_{Fe}}{l'_в - l};$$

$$l'_в - l \approx \tau, \qquad (148)$$

где $d_в$ и $l'_в$ — диаметр и длина вала до цапф;

$l$ — активная длина.

При наличии вентилируемых аксиальных каналов в роторе

$$\Lambda_{\Delta 2} = \frac{1}{R''_{\Delta 2}} = \frac{\pi D'_r l k_{Fe}}{h_{j2}}, \qquad (148а)$$

где $D'_r$ — диаметр по центру осевых каналов ротора.

4. Проводимости $\Lambda_{л1}$ и $\Lambda_{л2}$ определяются по формулам

$$\Lambda_{л1} = \alpha_л S_{л1} + \alpha_{к1} S_{к1};\quad \Lambda_{л2} = \alpha_л S_{л2} + \alpha_{к2} S_{к2}, \qquad (148б)$$

где $\alpha_к$ по формулам (51) или (186).

Коэффициенты теплоотдачи от лобовых частей статора и изолированного ротора при отсутствии особой внутренней вентиляции, можно принять одинаковыми и равными

$$\alpha_л \approx 14 \cdot 10^{-4}\,(1 + \sqrt{v_л})\ вт/см^2\,°C, \qquad (149)$$

где $v_л \approx 0{,}45 v_a$. При переменной скорости надо подставлять среднюю скорость.

При особой вентиляции следует подставлять скорость продувания воздуха через решетку лобовых частей и через осевые каналы $v_к$.

Поверхности теплоотдачи $S_{л1}$, $S_{к1}$, $S_{л2}$ и $S_{к2}$ включают всю обдуваемую поверхность лобовых частей, торцовые поверхности и поверхности осевых каналов, если таковые имеются.

Можно принять:

$$S_{л1} = Z_1 \Pi_1 l_{л1} k'_{л1};$$
$$S_{л2} = Z_2 \Pi_2 l_{л2} k'_{л2};$$
$$S_к = \pi d_к n_к l,$$

где $k'_{л1}$ и $k'_{л2}$ — коэффициенты обдуваемости [стр. 174].

5. Тепловая проводимость $\Lambda_{ап}$ может быть принята равной

$$\Lambda_{ап} = \alpha_{ап} S_{ап}, \tag{150}$$

где

$$\alpha_{ап} \approx \alpha_л;$$

$S_{ап}$ — внутренняя обдуваемая поверхность корпуса и вала

$$S_{ап} \approx \pi D_п (l_п - l) + \frac{\pi D_п^2}{2}. \tag{151}$$

Расчет тепловых проводимостей и потерь закрытой машины, также как и для открытой машины, можно относить к $\pi Dl$. Вводя при этом условные удельные нагрузки

$$w_1 = \frac{p_1}{\pi Dl}, \quad w_2 = \frac{p_2}{\pi Dl}, \tag{152}$$

а также условные удельные проводимости $\alpha = \frac{\Lambda}{\pi Dl}$, получим по (142)

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\varepsilon (w_1 + k_{12} w_2)}{\alpha_{11} - k_{12} (\alpha_{12} + \Delta\alpha)} \\ \theta_2 &= \frac{\varepsilon (w_2 + k_{21} w_1)}{\alpha_{22} - k_{21} (\alpha_{12} + \Delta\alpha)} \end{aligned}\right\}, \tag{153}$$

где

$$k_{12} = \frac{\alpha_{12} + \Delta\alpha}{\alpha_{22}}; \quad k_{21} = \frac{\alpha_{12} + \Delta\alpha}{\alpha_{11}};$$

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{12} &= \frac{\Lambda_{12}}{\pi Dl} = \alpha_\delta; \quad \Delta\alpha = \frac{\Delta\Lambda}{\pi Dl} = (1 - \varkappa)\, \alpha_л k_{Sл_1} \\ \alpha_{11} &= \frac{\Lambda_{11}}{\pi Dl} = \alpha_\delta + \frac{D_п}{D} \alpha_{\Delta_1} + \alpha_{л_1} k_{Sл_1} + \alpha_{к_1} k_{Sк_1} \\ \alpha_{22} &= \frac{\Lambda_{22}}{\pi Dl} = \alpha_\delta + \frac{d_в^2}{4Dl} \alpha_{\Delta_2} + \alpha_{л_2} k_{Sл_2} + \alpha_{к_2} k_{Sк_2} \end{aligned}\right\}. \tag{153a}$$

Коэффициенты $k_{sл1}$, $k_{sл2}$ и $k_{sк}$ представляют отношения обдуваемых поверхностей лобовых частей и каналов $S_{л1}\varkappa_1$, $S_{л2}\varkappa_2$ и $S_к$ к $\pi Dl$. Приближенно можно принять

$$\left.\begin{aligned} k_{sл1} &= 0{,}7 \left(\frac{D_n^2}{2Dl} + \frac{l_{л1}}{l}\right) \\ k_{sл2} &= 0{,}7 \left(\frac{D}{2l} + \frac{l_{л2}}{l}\right) \\ k_{sк} &= \frac{d_k n_k}{D} \end{aligned}\right\}. \tag{154}$$



Предполагается, что лобовые части закрыты бандажами или, что решетка лобовых частей не вентилируется; $\varkappa_1 = \varkappa_2$ положено равным 0,7. При более точных расчетах следует считать охлаждающие поверхности более точно с учетом особенностей конструкции данной машины.

Перепады температуры в железе могут быть определены на основании формул (8) и (10), принимая во внимание, что максимум температуры железа будет вблизи зазора:

$$\Delta\theta_{Fe_1} = \frac{q_1 (h'_1)^2}{3k_{Fe_1}} \quad и \quad \Delta\theta_{Fe_2} = \frac{q_2 (h'_2)^2}{3k_{Fe_2}}, \tag{155}$$

где $h'_1$ и $h'_2$ — высота спинки плюс высота зубца для статора и ротора;

$q_1$ и $q_2$ — удельные потери в стали, *вт/см³*:

$$q_1 = \frac{\varepsilon p_{Fe_1}}{V_{Fe_1}} \quad и \quad q_2 = \frac{\varepsilon p_{Fe_2}}{V_{Fe_2}}.$$

Перепад в изоляции

$$\theta_{i_1} = \frac{\varepsilon p_{Cu_1} \Delta_i}{\frac{1}{2} l_w Z_1 \Pi_1 k_i} = w'_1 \frac{\Delta_i}{k_i}, \tag{156}$$

где $w'_1 = \frac{\varepsilon p_{Cu_1}}{\frac{1}{2} l_w Z_1 \Pi_1}$ — удельный тепловой поток через изоляцию;

$\Delta_i$ и $k_i$ — толщина и теплопроводность изоляции;

$\Pi_1$ — периметр паза;

$Z_1$ — число пазов;

$l_w$ — длина витка.

Перепад в изоляции фазного ротора рассчитывается аналогично.

Для короткозамкнутого ротора перепад температуры $\theta_{i_2}$ имеет место в воздушном зазоре между стержнем и зубцом ротора (за исключением роторов с заливкой алюминием). Этот перепад определяется тепловым потоком, идущим в радиальном направлении к охлаждающим каналам в случае вентилируемого ротора, и тепловым сопротивлением воздушного зазора

$$\theta_{i_2} = \varepsilon p_{2\,рад} R_{i_2}, \tag{157}$$

где

$$p_{2\,рад} = p_2 \frac{\Lambda_{рад}}{\Lambda_{рад} + \Lambda_{акс}} \approx p_{2п} = p_2 - p_{2л}. \tag{158}$$

Ввиду большой проводимости стержня $\Lambda_{акс} \approx \Lambda_{л2}$. Тепловая проводимость в радиальном направлении может быть представлена в виде

$$\Lambda_{рад} = \frac{1}{R_{i_2} + R'_{\Delta 2} + R_{к2}}, \tag{159}$$

где

$$R_{i_2} = \frac{\Delta_{i_2}}{S_{i_2} k_i};$$

$$R'_{\Delta_2} \approx \frac{h'_2}{k_{Fe}} \frac{1}{\pi (D_i - h'_2)\, l}; \tag{160}$$

$$R_{к_2} = \frac{1}{\alpha_{к_2} S_{к_2}}; \tag{160a}$$

$\Delta_{i_2}$ — может быть в пределах $0{,}02 \div 0{,}03$ *см*;

$S_{i_2}$ — поверхность соприкосновения всех стержней с ротором;

$S_{к_2}$ — общая поверхность каналов ротора.

При тепловом расчете **закрытых машин постоянного тока** необходимо учесть отличие характера теплопередачи от катушек полюсов к корпусу и отсутствие потерь в железе полюсов. В данном случае целесообразно в качестве тела *1* принять обмотку полюсов, а полюса и ярмо считать за корпус. При этом взаимной теплопроводностью между телами можно пренебречь и рассчитывать $\theta_1$ и $\theta_2$ независимо, т. е.

$$\theta_1 = \frac{\varepsilon p_1}{\Lambda_{1s}}; \quad \theta_2 = \frac{\varepsilon p_2}{\Lambda_{2s}}, \tag{161}$$

где $\Lambda_{1s}$ — суммарная тепловая проводимость от обмоток полюсов к внутреннему воздуху и корпусу машины

$$\Lambda_{1s} = \alpha_л S_л + S_l \frac{k_l}{\Delta_i}; \tag{162}$$

$S_л$ — обдуваемая поверхность катушек полюсов;

$S_l$ — поверхность соприкосновения катушек с полюсами и корпусом;

$\Delta_i, k_i$ — толщина и теплопроводность изоляции между катушками и корпусом;

$\alpha_л$ — по (149).

Для вращающегося якоря

$$\Lambda_{2s} = \alpha_л S_2, \tag{163}$$

где $S_2$ — полная обдуваемая поверхность якоря в активной и лобовой части с учетом каналов (если таковые имеются)

$$S_2 = \left[\pi D\,(l + 0{,}5\tau) + \frac{\pi}{2} D^2\right] k_s, \tag{164}$$

$k_s$ — коэффициент, учитывающий увеличение поверхности за счет каналов.

Полное превышение температуры обмотки якоря и обмотки возбуждения:

$$\theta_{Cu_2} = \theta_2 + \theta_{i_2} + \Delta\theta_{Fe_2} + \theta_п;$$
$$\theta_{Cu_1} = \theta_1 + \theta_{i_1} + \Delta\theta_{Cu_1} + \theta_п,$$

где $\Delta\theta_{Cu_1}$ — внутренний перепад по толщине катушки по (10) и (197).

Для катушек полюсов в машинах постоянного тока, если они изолированы с поверхности слоем изоляции $\Delta_{i_1}$, для определения $\theta_i$ надо подставить в (156): вместо $П_1$ — периметр катушки полюса $П_2$, а вместо $Z_1$ — число полюсов $2p$.

**Уточнение теплового расчета закрытых машин путем рассмотрения трех тел.** Более правильно рассматривать три тела: 1) зубцовую зону статора (без статорной обмотки), 2) ротор с обмоткой, 3) медь обмотки статора. Проводимость пазовой изоляции целесообразно рассматривать как взаимную тепловую проводимость тел *1* и *3*: $\Lambda_{13} = \Lambda_{31} = \Lambda_{п_1}$. В остальном допущения те же, что и в случае 2 тел. Пренебрегая величиной взаимной тепловой проводимости $\Lambda_{32}$, вместо системы (140) получим

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon p_1 &= (\theta_1 - \theta_3)\,\Lambda_{13} + \theta_1 \Lambda_{\Delta_1} + (\theta_1 - \theta_2)\,\Lambda_{12} \\ \varepsilon p_2 &= (\theta_2 - \theta_1)\,\Lambda_{12} + (\theta_2 - \theta_{ai})\,\Lambda_{л2} + \theta_2 \Lambda_{\Delta 2} \\ \varepsilon p_3 &= (\theta_3 - \theta_1)\,\Lambda_{31} + (\theta_3 - \theta_{ai})\,\Lambda'_{л3} = (\theta_3 - \theta_1)(\Lambda_{31} + \Lambda'_{л3}) + \\ &\quad + (\theta_1 - \theta_{ai})\,\Lambda'_{л3} \end{aligned}\right\}, \tag{165}$$

где $p_1 = p_z$ — потери в железе зубцов;

$p_3 = p_{Cu}$ — потери в обмотке статора;

$\Lambda'_{л3}$ — тепловая проводимость обмотки через лобовые части к внутреннему воздуху.

Из последнего уравнения получаем

$$\theta_3 - \theta_1 = \frac{\varepsilon p_3 - (\theta_1 - \theta_{ai})\,\Lambda'_{л3}}{\Lambda_{31} - \Lambda'_{л3}}. \tag{166}$$



Подставляя (166) в первое уравнение системы (165), получим систему, аналогичную (140), но в качестве потерь $\varepsilon p_1$ следует подставить

$$\varepsilon p'_1 = \varepsilon \left(p_z + p_{Cu} \frac{\Lambda_п}{\Lambda_п + \Lambda'_{л3}}\right), \tag{167}$$

а вместо $\Lambda_{л1}$

$$\Lambda'_{л1} = \frac{\Lambda'_{л3}\Lambda_п}{\Lambda'_{л3} + \Lambda_п}. \tag{168}$$

При этом уравнения (142) для $\theta_1$ и $\theta_2$, а также (143) для $\theta_{Cu1}$ и $\theta_{Cu2}$ сохраняют свой вид.

Проводимости $\Lambda_п$ и $\Lambda'_{л3}$ определяются по формулам:

$$\Lambda_п = \frac{k_i l П_1 Z_1}{\Delta_i};$$

$$\Lambda'_{л3} = \frac{\Lambda_{л1}\Lambda_{iл}}{\Lambda_{л1} + \Lambda_{iл}};$$

$$\Lambda_{iл} = \Lambda_п \frac{l_л}{l},$$

где $\Lambda_{л1}$ — по (148б).

Данный способ позволяет определить максимальную температуру обмотки по (110а).

Для иллюстрации вышеизложенной методики приводим пример расчета кранового асинхронного двигателя типа МТВ-713.

1. Характеристика двигателя и данные электромагнитного расчета:

$$P_N = 200\ квт;\ U_N, = 380/220\ в;\ n = 600\ об/мин;$$

$$I_N = 454 а;\ ПВ = 25\%;\ f = 50\ гц.$$

Геометрия статора и ротора: $\tau = 15{,}1$ *см*; $D = 48$ *см*; $D_j = 65$ *см*; $l = 48$ *см*; $Z_1 = 75$; $b_{п1} = 0{,}98$ *см*; $h_{п1} = 4{,}35$ *см*; $\Delta_{i1} = 0{,}183$ *см*; $\delta = 0{,}11$ *см*; $l_л = 24{,}7$ *см*; $l_{w1} = 145{,}4$ *см*; $Z_2 = 90$; $b_{п2} = 0{,}62$ *см*; $h_{п2} = 3{,}35$ *см*; $\Delta_{i2} = 0{,}134$ *см*; $l_{л2} = 26{,}2$ *см*; $l_{w2} = 148{,}4$ *см*.

Геометрия корпуса и вентилятора: $D_п \approx D_j = 65$ *см*; $D_v = 55$ *см*; $b_v = 9$ *см*; $b_к = 7{,}5$ *см*; $l_п = 63$ *см*; $t_р =$ *см*; $h_р = 5$ *см*.

Потери: $p_{Cu1} = 6{,}92$ *квт*; $p_{Fe1} = 3{,}95$ *квт*; $p_{j1} = 1{,}35$ *квт*; $p_{z1} = 2{,}6$ *квт*; $p_{Cu2} = 5{,}10$ *квт*; $p_{мех} = 2{,}14$ *квт*; $p_{доб} = 1{,}1$ *квт*; $p_щ = 0{,}32$ *квт*; $\Sigma p = 19{,}53$ *квт*.

2. Определение перегрева корпуса над охлаждающим воздухом. Скорость воздуха у наружной спинки корпуса при $v_v = v_{vN}$ и $\frac{\eta}{\eta_{max}} = 1$

$$v_п = 0{,}25 \frac{b_v}{b_к} v_v = 0{,}25 \frac{9}{7{,}5} \cdot 17{,}3 = 5{,}2\ м/сек,$$

где

$$v_v = \frac{\pi D_v n}{60} = \frac{\pi\, 0{,}55 \cdot 600}{60} = 17{,}3\ м/сек.$$

Условные поверхности теплоотдачи

$$S_{п1} = \pi D_п l_п k_п = \pi\, 65 \cdot 63 \cdot 1{,}89 = 24\ 300\ см^2,$$

где при $\varepsilon' = 1$

$$k_п = 1 + \frac{2h_р}{t_р}\left(1 - \frac{0,5}{1+0,5\sqrt{v_п\varepsilon'}}\right)k_р = 1 + \frac{2\cdot5}{6}\times$$

$$\times\left(1-\frac{0,5}{1+0,5\sqrt{5,2}}\right)0,7 = 1,89;$$

$$S_{п2} = \frac{\pi D_п^2}{2}k_{п2} = \frac{\pi 65^2}{2}1 = 6635\ см^2,$$

где $k_{п2}=1$, так как на щитах ребер нет.

Перегрев корпуса

$$\theta_п = \left(\frac{2,92\varepsilon\Sigma p}{S_{п1}\alpha_0(1+0,5\sqrt{v_п\varepsilon'})+S_{п2}\alpha_0}\right)^{3/4} =$$

$$= \left(\frac{2,92\cdot0,25\cdot19\,530}{24\,300\cdot14\cdot10^{-4}(1+0,5\sqrt{5,2})+6635\cdot14\cdot10^{-4}}\right)^{3/4}\approx 47°C.$$

3. Условные удельные проводимости и коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_\delta = \alpha_{12} = 14\cdot10^{-4}(1+0,5\sqrt{15,1}) = 41,2\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C;$$

$$\Delta\alpha = (1-\varkappa)\alpha_л k_{sл1} = (1-0,7)\,52,5\cdot10^{-4}\cdot1 = 15,8\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C,$$

где

$$\varkappa = 0,7;\ \alpha_л = 14\cdot10^{-4}(1+\sqrt{0,5\cdot15,1}) = 52,5\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C;$$

$$k_{sл1} = \varkappa\left(\frac{D_п^2}{2Dl}+\frac{l_{л1}}{l}\right) = 0,7\left(\frac{65^2}{2\cdot48\cdot48}+\frac{24,7}{48}\right) = 1,0;$$

$$\alpha_{11} = \alpha_\delta + \frac{D_п}{D}\alpha_{\Delta1}+\alpha_{л1}k_{sл1} = \left(41,2+\frac{65}{48}170+52,5\right)10^{-4} =$$

$$= 323,7\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C,$$

где

$$\alpha_{\Delta1} = \frac{\frac{k_i}{\Delta}\frac{k_{Fe}}{h_1'}}{\frac{k_i}{\Delta}+\frac{k_{Fe}}{h_1'}} = \frac{\frac{0,23\cdot10^{-3}}{0,75\cdot10^{-2}}\frac{0,32}{8,5}}{\frac{0,23\cdot10^{-3}}{0,75\cdot10^{-2}}+\frac{0,32}{8,5}} = 170\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C;$$

$$\alpha_{22} = \alpha_\delta + \frac{d_в^2}{4Dl}\alpha_{\Delta2}+\alpha_{л2}k_{sл2} = \left(41,2+\frac{12^2\cdot670}{4\cdot48\cdot48}+52,5\cdot0,732\right)10^{-4} =$$

$$= 90,1\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C,$$

где

$$\alpha_{\Delta2} = \frac{2k_{Fe}}{l_в'-l} = \frac{2\cdot0,50}{15} = 0,067\ вт/см^2\ °C\ (принимаем\ l_в'-l\approx15\ см),$$

$$k_{sл2} = \varkappa\left(\frac{D}{2l}+\frac{l_{л2}}{l}\right) = 0,7\left(\frac{48}{2\cdot48}+\frac{26,2}{48}\right) = 0,732.$$

4. Суммарные потери и условная удельная нагрузка:
первого тела

$$p_1 = p_{Cu1}+p_{c1}+0,5p_{доб} = 6,92+2,60+0,5\cdot1,1 = 10,07\ квт,$$

$$w_1 = \frac{p_1}{\pi Dl} = \frac{10\,070}{\pi\,48\cdot48} = 1,39\ \frac{вт}{см^2};$$



второго тела

$$p_2 = p_{Cu2}+0,5p_{доб} = 5,10+0,5\cdot1,1 = 5,65\ квт;$$

$$w_2 = \frac{p_2}{\pi Dl} = \frac{5\cdot650}{\pi\,48\cdot48} = 0,783\ \frac{вт}{см^2}.$$

5. Средние перегревы двух тел над корпусом:

$$\theta_1 = \frac{\varepsilon(w_1+k_{12}w_2)}{\alpha_{11}-k_{12}(\alpha_{12}+\Delta\alpha)} = \frac{0,25(1,39+0,633\cdot0,783)}{323,7\cdot10^{-4}-0,633(41,2+15,8)10^{-4}} = 16,5\ °C;$$

$$\theta_2 = \frac{\varepsilon(w_2+k_{21}w_1)}{\alpha_{22}-k_{21}(\alpha_{12}+\alpha\Delta)} = \frac{0,25(0,783+0,176\cdot1,39)}{90,1\cdot10^{-4}-0,176(41,2+15,8)10^{-4}} = 32°C,$$

где

$$k_{21} = \frac{\alpha_{12}+\Delta\alpha}{\alpha_{11}} = \frac{(41,2+15,8)10^{-4}}{323,7\cdot10^{-4}} = 0,176,$$

$$k_{12} = \frac{\alpha_{12}+\Delta\alpha}{\alpha_{22}} = \frac{(41,2+15,8)10^{-4}}{90,1\cdot10^{-4}} = 0,633.$$

6. Перепады температуры:
в изоляции статора

$$\theta_{i1} = \frac{\varepsilon p_{Cu1}\Delta_{i1}}{\frac12 l_{w1}Z_1\Pi_1k_i} = \frac{0,25\cdot6,92\cdot0,183\cdot10^3}{0,5\cdot145,4\cdot75\cdot9,5\cdot0,0015} = 4,1°C;$$

в изоляции ротора

$$\theta_{i2} = \frac{\varepsilon p_{Cu2}\Delta_{i2}}{\frac12 l_{w2}Z_2\Pi_2k_i} = \frac{0,25\cdot5,1\cdot0,134\cdot10^3}{0,5\cdot148,4\cdot90\cdot7,6\cdot0,0015} = 2,3°C;$$

в активной стали

$$\Delta\theta_{Fe1} = \frac{q_1(h_1')^2}{3k_{Fe}} = \frac{0,07\cdot8,5^2}{3\cdot0,32} = 5,3°C,$$

где

$$q_1 = \frac{p_{Fe1}}{V_{Fe1}} = \frac{3,95\cdot10^3}{\left[\frac{\pi}{4}(65^2-48^2)-75\cdot4,35\cdot0,98\right]48} = 0,07\ вт/см^3.$$

Величиной $\Delta\theta_{Fe2}$ пренебрегаем.

7. Перегрев меди статора и ротора:

$$\theta_{Cu1} = \theta_п+\theta_1+\theta_{i1}+\Delta\theta_{Fe1}+\theta_{ав} = 47+16,5+4,1+5,3+3 = 75,9°C;$$

$$\theta_{Cu2} = \theta_п+\theta_2+\theta_{i2}+\theta_{ав} = 47+32+2,3+3 = 84,3\ C.$$

Произведем для сравнения расчет по теории трех тел:

$$\alpha_{л3}' = \frac{\alpha_л\frac{k_i}{\Delta_i}}{\alpha_л+\frac{k_i}{\Delta_i}} = \frac{52,5\cdot10^{-4}\frac{0,0015}{0,183}}{52,5\cdot10^{-4}+\frac{0,0015}{0,183}} = 32\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C;$$

$$\alpha_п = \frac{k_i\Pi_1Z_1}{\Delta_i\pi D} = \frac{0,0015\cdot9,5\cdot75}{0,183\cdot\pi\cdot48} = 387\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C;$$

$$\alpha_{л1}' = \frac{\alpha_п\alpha_{л3}'}{\alpha_п+\alpha_{л3}'} = \frac{387\cdot32}{387+32}10^{-4} = 29,5\cdot10^{-4}\ вт/см^2\ °C;$$

$$\Delta\alpha = (1 - 0{,}7)\, 29{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 8{,}9 \cdot 10^{-4} \quad вт/см^2\ °C;$$

$$\alpha_{11} = \left(41{,}2 + \frac{65}{48}\, 170 + 29{,}5\right) 10^{-4} = 300 \cdot 10^{-4} \quad вт/см^2\ °C;$$

$$k_{21} = \frac{\alpha_{12} + \Delta\alpha}{\alpha_{11}} = \frac{(41{,}2 + 8{,}9)\, 10^{-4}}{300 \cdot 10^{-4}} = 0{,}167;$$

$$k_{12} = \frac{\alpha_{12} + \Delta\alpha}{\alpha_{22}} = \frac{(41{,}2 + 8{,}9)\, 10^{-4}}{90{,}1 \cdot 10^{-4}} = 0{,}556;$$

$$p_1' = p_z + 0{,}5 p_{доб} + p_{Cu} \frac{\alpha_п}{\alpha_п + \alpha_{л3}'} = 2600 + 550 + 6920\, \frac{387}{387 + 32} = 9530 \quad вт;$$

$$w_1' = \frac{p_1'}{\pi D l} = \frac{9530}{\pi\, 48 \cdot 48} = 1{,}32 \quad вт/см^2;$$

$$\theta_1 = \frac{0{,}25\,(1{,}32 + 0{,}556 \cdot 0{,}783)}{300 \cdot 10^{-4} - 0{,}556\,(41{,}2 + 8{,}9)\, 10^{-4}} = 16{,}1 °C;$$

$$\theta_2 = \frac{0{,}25\,(0{,}783 + 0{,}167 \cdot 1{,}32)}{90{,}1 \cdot 10^{-4} - 0{,}167\,(41{,}2 + 8{,}9)\, 10^{-4}} = 30{,}6 °C.$$

Как видно из сравнения результатов расчета по методу двух и трех тел, разница в определении $\theta_1$ составляет $16{,}5 - 16{,}1 = 0{,}4 °C$, а для ротора $32 - 30{,}6 = 1{,}4 °C$, т. е. в данном случае можно считать с достаточной точностью по методу двух тел.

## 6-6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЗАКРЫТЫХ МАШИН С ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ СТАТОРА И ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ РОТОРА

В данном случае (рис. 68) тепловой поток, создаваемый в статоре потерями в меди и в железе, отдается: охлаждающему воздуху внутри машины через поверхности лобовых частей и торцовые части железа статора, ротору через воздушный зазор и воде*, омывающей оболочку статора.

Тепловой поток, создаваемый в роторе, передается: охлаждающему воздуху внутри машины через поверхности лобовых частей и осевые каналы в теле ротора, статору через воздушный зазор и корпусу машины через вал и подшипниковые щиты (последняя часть тепла обычно незначительна).

Целесообразно сначала определить среднее превышение температуры внешних поверхностей зубцовой зоны и обмотки статора и ротора над средней температурой охлаждающего воздуха

$$\theta_{ai}^{\circ} = \frac{1}{2}\left(\theta_{a\ гор}^{\circ} + \theta_{a\ хол}^{\circ}\right).$$

При этом для расчета температуры меди достаточно прибавить к этим превышениям перепады в изоляции и разницу между средней температурой железа и средней температурой поверхности, т. е. температуры обмоток будут:

$$\left.\begin{aligned} \theta_{Cu_1}^{\circ} &= \theta_1 + \theta_{i1} + \Delta\theta_{Fe1} + \theta_{ai}^{\circ} \\ \theta_{Cu_2}^{\circ} &= \theta_2 + \theta_{i2} + \Delta\theta_{Fe2} + \theta_{ai}^{\circ} \end{aligned}\right\}. \qquad (169)$$

Для определения средней температуры охлаждающего воздуха исходим из средней температуры охлаждающей воды

$$\theta_в^{\circ} = \theta_{вх}^{\circ} + 0{,}5\Delta\theta_в,$$

где $\Delta\theta_в$ — подогрев, а $\theta°_{вх}$ — температура входящей воды

$$\Delta\theta_в = \frac{\varepsilon\Sigma p}{c_p \gamma V_в} = \frac{\varepsilon\Sigma p}{4200 V_в}, \qquad (170)$$

$V_в$ — расход воды в литрах в секунду, $\Sigma p$ в *вт*.

Тепло, отданное воде при прохождении внутреннего воздуха по трубкам в корпусе статора, плюс тепло, отданное стенкам щитов, равно теплу, взятому от охлаждаемых поверхностей статора и ротора, т. е.

$$\Lambda_{к1}'\left(\theta_{ai}^{\circ} - \theta_в^{\circ}\right) + \Lambda_{aп}\left(\theta_{ai}^{\circ} - \theta_п\right) = \left(\theta_1^{\circ} - \theta_{ai}^{\circ}\right)\Lambda_{л1} + \left(\theta_2^{\circ} - \theta_{ai}^{\circ}\right)\left(\Lambda_{л2} + \Lambda_{к2}'\right), \qquad (171)$$

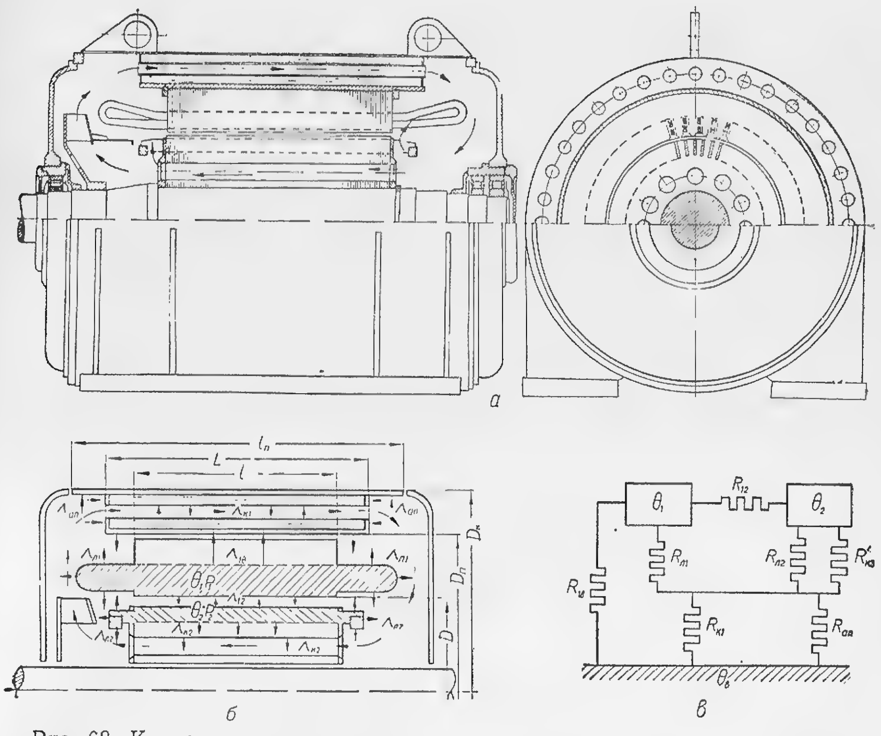



Рис. 68. К расчету нагрева закрытого двигателя с водяным охлаждением:
*а* — конструкция закрытого асинхронного двигателя с водяным охлаждением корпуса статора (тип AW-733-4; *б* — структурная схема двигателя как системы двух тел; *в* — эквивалентная тепловая схема.

где $\Lambda_{к1}' = \alpha_{к1}' S_{к1}$ — тепловая проводимость через поверхность трубок в корпусе статора от воздуха к воде (температуру поверхности трубок принимаем равной температуре воды $\theta_в^{\circ}$);

$$\alpha_{к1}' = \frac{\alpha_{к1}\alpha_в}{\alpha_{к1} + \alpha_в}; \qquad (171а)$$

$\alpha_{к1}$ — коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенкам трубки;

$\alpha_в$ — то же от трубки к воде (см. ниже);

$\Lambda_{л1} = \alpha_{л1} S_{л1}$ — тепловая проводимость от поверхности лобовых и торцовых частей статора и каналов, если таковые имеются;

$\Lambda_{л2} = \alpha_{л2} S_{л2}$ — то же для ротора;

* Говоря о жидкости, мы далее будем иметь в виду воду. Для другой жидкости изменяется только величина постоянных $c_p$, $\gamma$, $\alpha$, входящих в формулы.

$\Lambda'_{к2} = \alpha'_{к2} S_{к2}$ — тепловая проводимость в каналах ротора;

$\Lambda_{ап} = \alpha'_{ап} S_{ап}$ — тепловая проводимость к корпусу машины в зоне лобовых частей статора;

$\alpha'_{ап} = \dfrac{\alpha_{ап}\alpha_{в}}{\alpha_{ап} + \alpha_{в}}$ — эквивалентный коэффициент теплопередачи от поверхности $S_{ап}$ к воде (рис. 68);

$$S_{ап} \approx \pi D_{к}(l_{п} - l) + \pi D_{п}(l - l_{Fe}) + \frac{\pi}{2}(D_{к}^2 - D_{п}^2); \qquad (171б)$$

$\alpha_{ап} \approx \alpha_{л1}$ — может быть рассчитан по (149).

Если температуру поверхности щитов можно считать близкой к $\theta_{в}^{\circ}$, то, обозначая $\theta_{1}^{\circ} - \theta_{ai}^{\circ} = \theta_1$ и $\theta_{2}^{\circ} - \theta_{ai}^{\circ} = \theta_2$, из (171) получим

$$\theta_{ai}^{\circ} - \theta_{в}^{\circ} = \frac{\theta_1\Lambda_{л1} + \theta_2(\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2})}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}}. \qquad (172)$$

В тех случаях, когда вследствие высокой температуры помещения $\theta_{п}^{\circ} \gg \theta_{в}^{\circ}$, можно пренебречь отдачей тепла через щиты и положить $\Lambda_{ап} \approx 0$. Для определения $\theta_1$ и $\theta_2$ составляем уравнения теплового баланса

$$\left.\begin{aligned} \theta_1\Lambda_{л1} + (\theta_1 - \theta_2)\Lambda_{12} + (\theta_1 + \theta_{ai}^{\circ} - \theta_{в}^{\circ})\Lambda_{1в} = \varepsilon p_1 \\ \theta_2(\Lambda_{л2} + \Lambda_{к2}) + (\theta_2 - \theta_1)\Lambda_{21} = \varepsilon p_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (173)$$

где $\Lambda_{12} = \Lambda_{21} = \Lambda_{\delta}$ — проводимость зазора;

$\Lambda_{1в}$ — эквивалентная проводимость от статора к воде.

Подставляя $\theta_{ai}^{\circ} - \theta_{в}^{\circ}$ из (172) в (173), получим систему

$$\left.\begin{aligned} \theta_1\Lambda_{11} - \theta_2\Lambda'_{12} = \varepsilon p_1 \\ -\theta_1\Lambda_{12} + \theta_2\Lambda_{22} = \varepsilon p_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (174)$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 = \frac{\varepsilon p_1\Lambda_{22} + \varepsilon p_2\Lambda'_{12}}{\Lambda_{11}\Lambda_{22} - \Lambda_{21}\Lambda'_{12}} = \frac{\varepsilon(p_1 + k_{12}p_2)}{\Lambda_{11} - k_{12}\Lambda_{21}} \\ \theta_2 = \frac{\varepsilon p_2\Lambda_{11} + \varepsilon p_1\Lambda_{21}}{\Lambda_{11}\Lambda_{22} - \Lambda_{21}\Lambda'_{21}} = \frac{\varepsilon(p_2 + k_{21}p_1)}{\Lambda_{22} - k_{21}\Lambda_{21}} \end{aligned}\right\}, \qquad (175)$$

где

$$\Lambda_{11} = \Lambda_{л1} + \Lambda_{12} + \Lambda_{1в} + \frac{\Lambda_{1в}\Lambda_{л1}}{\Lambda_{ап} + \Lambda'_{к1}}; \qquad (176)$$

$$\Lambda_{22} = \Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2} + \Lambda_{21}; \qquad (177)$$

$$\Lambda'_{12} = \Lambda_{12} - \frac{\Lambda_{1в}(\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2})}{\Lambda_{ап} + \Lambda'_{к1}}; \qquad (178)$$

$$k_{12} = \frac{\Lambda'_{12}}{\Lambda_{22}}; \quad k_{21} = \frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{11}}. \qquad (179)$$

При учете трех тел по методу, изложенному выше, надо подставить вместо $p_1$ величину $p'_1$ по (167) и вместо $\Lambda_{л1}$ величину $\Lambda'_{л1}$ по (168). Все прочие величины останутся без изменения. Перепады $\theta_{i1}$, $\theta_{i2}$, $\Delta\theta_{Fc1}$ и $\Delta\theta_{Fe2}$ определяются по (155), температуры обмоток — по (169), а температуры железа будут отличаться от температуры обмоток на величину перепадов изоляции $\theta_{i1}$ и $\theta_{i2}$. Температура $\theta_{ai}^{\circ}$ найдется из (172) при известных $\theta_1$ и $\theta_2$

$$\theta_{ai}^{\circ} = \theta_{в}^{\circ} + \theta_1\frac{\Lambda_{л1}}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}} + \theta_2\frac{\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2}}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}}. \qquad (180)$$



Для случая вентилируемого воздушного зазора вместо уравнений (173) получим при $\Lambda_{\delta} = \alpha_{\delta}\pi D l$

$$\left.\begin{aligned} \theta_1(\Lambda_{л1} + \Lambda_{\delta}) + (\theta_1 + \theta_{ai}^{\circ} - \theta_{в}^{\circ})\Lambda_{1в} = \varepsilon p_1 \\ \theta_2(\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2} + \Lambda_{\delta}) = \varepsilon p_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (181)$$

откуда

$$\theta_2 = \frac{\varepsilon p_2}{\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2} + \Lambda_{\delta}}. \qquad (182)$$

Подставляя в первое уравнение (181) $\theta_{ai}^{\circ} - \theta_{в}^{\circ}$ из (172), получим

$$\theta_1\left(\Lambda_{л1} + \Lambda_{\delta} + \Lambda_{1в} + \frac{\Lambda_{1в}\Lambda_{л1}}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}}\right) + \theta_2\frac{(\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2})\Lambda_{1в}}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}} = \varepsilon p_1. \qquad (183)$$

Подставляя $\theta_2$ из (182), находим

$$\theta_1 = \frac{\varepsilon(p_1 - k_1k_2p_2)}{\Lambda_{11}}, \qquad (184)$$

где

$$\left.\begin{aligned} \Lambda_{11} = \Lambda_{л1} + \Lambda_{\delta} + \Lambda_{1в} + \frac{\Lambda_{1в}\Lambda_{л1}}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}} \\ k_1 = \frac{\Lambda_{1в}}{\Lambda'_{к1} + \Lambda_{ап}}; \quad k_2 = \frac{\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2}}{\Lambda_{л2} + \Lambda'_{к2} + \Lambda_{\delta}} \end{aligned}\right\} \qquad (185)$$

(согласно вышесказанному можно положить $\Lambda_{ап} \approx 0$). Найдя $\theta_1$ и $\theta_2$, по (180) получим $\theta_{ai}^{\circ}$, а по (169) $\theta_{Cu1}^{\circ}$ и $\theta_{Cu2}^{\circ}$. При учете трех тел справедливо сказанное выше о величине $p'_1$ и $\Lambda'_{л1}$.

Определение тепловых проводимостей производят следующим образом:

1. Проводимости $\Lambda_{л1}$ (или $\Lambda'_{л1}$), $\Lambda_{л2}$, $\Lambda_{\delta}$, $\Lambda_{ап}$ определяются аналогично формулам (144) — (151).

2. Проводимости $\Lambda'_{к1}$ и $\Lambda'_{к2}$ определяются как произведения эквивалентных коэффициентов теплоотдачи в каналах статора $\alpha'_{к1}$ и ротора $\alpha'_{к2}$ на соответствующие поверхности каналов, т. е.

$$\Lambda'_{к1} = \alpha'_{к1}S_{к1} \text{ и } \Lambda'_{к2} = \alpha'_{к2}S_{к2},$$

где

$$S_{к1} = n_{к1}\pi d_{к1}l_{к1}; \; S_{к2} = n_{к2}\pi d_{к2}l_{к2},$$

$n_{к}$, $d_{к}$, $l_{к}$ — число, диаметр и длина канала;

$$\alpha_{к1} = 44{,}9\left(\frac{30}{L}\right)^{0{,}256} r^{0{,}088}\left(\frac{v_{к1}}{10}\right)^{0{,}832} \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2\ {}^{\circ}\text{C}$$

(гладкие поверхности труб [98]); (186)

$$\alpha_{к2} = 54{,}9\left(\frac{30}{L}\right)^{0{,}256} r^{0{,}088}\left(\frac{v_{к2}}{10}\right)^{0{,}832} \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2\ {}^{\circ}\text{C}$$

(шероховатые поверхности каналов);

$v_{к1}$ и $v_{к2}$ — скорости воздуха в каналах, *м/сек*;

$r$ — гидравлический радиус канала, *см*;

$L$ — длина канала, *см*; $\alpha'_{к}$ по (171а).

При вентиляционном расчете должны быть обеспечены скорости воздуха в пределах 10÷30 *м/сек* в зависимости от скорости вращения машины и желаемой интенсивности вентиляции.

Требуемый расход воздуха через каналы равен (при $p$ в *квт*)

$$V_a = \frac{\varepsilon (p_2 + 0{,}7 p_1)}{1{,}1 \Delta\theta_a}.$$

Обычно

$$\Delta\theta_a = 10 \div 15^\circ\text{C}.$$

3. Проводимость от железа статора к воде $\Lambda_{1\text{в}}$ определяется как обратная величина суммы тепловых сопротивлений

$$\frac{1}{\Lambda_{1\text{в}}} = R_{1\text{в}} = R'_{\Delta 1} + R''_{\Delta 1} + R_\Delta + R_\alpha, \tag{187}$$

где $R'_{\Delta 1}$ и $R''_{\Delta 1}$ — по (147) и (146);

$R_\Delta$ — тепловое сопротивление оболочки толщиной $\Delta$;

$$R_\Delta \approx \frac{\Delta}{k_{\text{Fe}}} \frac{1}{\pi D_\text{п} l}; \quad k_{\text{Fe}} \approx 0{,}7 \text{ вт/см °C};$$

$R_\alpha$ — тепловое сопротивление теплоотдачи поверхности кожуха к воде

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha_\text{в} \pi D_\text{п} l}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки оболочки к воде при свободной циркуляции * можно принять равным

$$\alpha_\text{в} = C_\text{в} (\Delta\theta)^{1/4}, \tag{188}$$

где $C_\text{в}$ — постоянная; в пределах от 10 до 50° С

$$C_\text{в} \approx 45 \sqrt{\theta^\circ_\text{в}}; \tag{189}$$

$\Delta\theta$ — разность между средней температурой оболочки и средней температурой охлаждающей жидкости. Поскольку в начале величина $\Delta\theta$ нам неизвестна, следует задаться ее ожидаемым значением, например $\Delta\theta = 25^\circ$ С.

4. Проводимость от железа ротора к каналам $\Lambda'_{\text{к}2}$ определяется как обратная величина суммы тепловых сопротивлений

$$\Lambda'_{\text{к}2} = \frac{1}{R'_{\Delta 2} + R_{\text{к}2}}, \tag{190}$$

где $R'_{\Delta 2}$ и $R_{\text{к}2}$ по формулам (160) и (160а).

Для иллюстрации методики приводится расчет температур асинхронного электродвигателя AW-733-4 [144] с водяным охлаждением корпуса статора, рис. 68.

Основные данные двигателя: $P_N = 400$ *квт*; $U_N = 6000$ *в*; $n = 1500$ об/мин; $\varepsilon = 1$; $D = 46$ *см*; $D_\text{п} = 76{,}2$ *см*; $\Delta = 1{,}5$ *см*; $D_\text{к} = 85$ *см*; $l_{\text{Fe}} = 45$ *см*; $l_{\text{л}1} = 77$ *см*; $l_\text{п} = 91$ *см*; $L = 67{,}8$ *см*; $\tau = 36$ *см*; $Z_1 = 60$; $h_{\text{п}1} = 6{,}5$ *см*; $b_{\text{п}1} = 1{,}3$ *см*; $\Delta_{i_1} = 0{,}3$ *см*; $l_\text{р} = 50$ *см*; $h'_1 = 13{,}6$ *см*; $h'_2 = 8{,}3$ *см*; $d_{\text{к}1} = 3{,}88$ *см*; $d_{\text{к}2} = 4{,}2$ *см*; $n_{\text{к}1} = 40$; $n_{\text{к}2} = 12$; $S_{\text{к}1} = 33\,000$ *см²*; $S_{\text{к}2} = 8000$ *см²*; $S_{i2} = 13\,000$ *см²*.

Потери двигателя: $p_{\text{Cu}1} = 6750$ *вт*; $p_{\text{Cu}2} = 4200$ *вт*; $p_{j1} = 2900$ *вт*; $p_{z1} = 5450$ *вт*; $p_{\text{доб}} = 2130$ *вт*; $p_{\text{мех}} = 3700$ *вт*; $p_1 = 6750 + 5450 + 0{,}5 \cdot 2130 = 13\,265$ *вт*; $p_2 = 4200 + 0{,}5 \cdot 2130 = 5265$ *вт*; $\sum p = 25\,130$ *вт*.

Расчет коэффициентов теплоотдачи:

по (149)

$$\alpha_{\text{л}1} = 14 \cdot 10^{-4} (1 + \sqrt{16{,}3}) = 70{,}5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт}}{\text{см}^2\,^\circ\text{C}},$$

* При принудительной циркуляции $\alpha_\text{в}$ по § 6-3 и § 12-39.



где $v_{\text{л}1} \approx 0{,}45 v_a = 0{,}45 \cdot 36 = 16{,}3$ *м/сек*;

для короткозамкнутого ротора

$$\alpha_{\text{л}2} = 28 \cdot 10^{-4} (1 + \sqrt{18}) = 141 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт}}{\text{см}^2\,^\circ\text{C}},$$

где $v_{\text{л}2} \approx 0{,}5 v_a = 0{,}5 \cdot 36 = 18$ *м/сек*.

Приближенно

$$\alpha_{a\text{п}} \approx \alpha_{\text{л}1} = 70{,}5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вт}}{\text{см}^2\,^\circ\text{C}};$$

по (144а) и (186)

$$\alpha_\delta = \alpha_{12} = 14 \cdot 10^{-4} (1 + 0{,}5 \sqrt{36}) = 56 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2\,^\circ\text{C};$$

$$\alpha_{\text{к}1} = 44{,}9 \cdot 10^{-4} \left(\frac{30}{67{,}8}\right)^{0{,}256} \left(\frac{3{,}88}{2}\right)^{0{,}088} \left(\frac{17{,}5}{10}\right)^{0{,}832} = 61{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2\,^\circ\text{C},$$

$$v_{\text{к}1} = \frac{v_a}{\frac{n_{\text{к}1} \pi d^2_{\text{к}1}}{4}} = \frac{0{,}84 \cdot 4}{40 \cdot \pi \cdot 0{,}039^2} = 17{,}5 \text{ м/сек};$$

$$V_a \approx \frac{\varepsilon (p_2 + 0{,}7 p_1)}{1{,}1 \Delta\theta_a} = \frac{5{,}265 + 0{,}7 \quad 13{,}265}{1{,}1 \cdot 15} \approx 0{,}84 \text{ м}^3\text{/сек};$$

по (186)

$$\alpha_{\text{к}2} = 54{,}9 \cdot 10^{-4} \left(\frac{30}{50}\right)^{0{,}256} \left(\frac{4{,}2}{2}\right)^{0{,}088} \left(\frac{50}{10}\right)^{0{,}832} = 195 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^{2\circ}\,\text{C},$$

где

$$v_{\text{к}2} \approx \frac{0{,}84 \cdot 4}{12 \pi 0{,}042^2} \approx 50 \text{ м/сек};$$

по (188)

$$\alpha_\text{в} = 227 \sqrt[4]{20} = 480 \text{ вт/м}^2\,^\circ\text{C} = 480 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2\,^\circ\text{C},$$

где

$$C_\text{в} \approx 45 \sqrt{\theta_\text{в}} = 45 \sqrt{25} = 227.$$

Расчет тепловых проводимостей:

$$\Lambda'_{\text{к}1} = \alpha'_{\text{к}1} S_{\text{к}1} = 55 \cdot 10^{-4} \cdot 33\,000 = 181 \text{ вт/°C},$$

где

$$\alpha'_{\text{к}1} = \frac{\alpha_{\text{к}1} \alpha_\text{в}}{\alpha_{\text{к}1} + \alpha_\text{в}} = \frac{61{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 480 \cdot 10^{-4}}{61{,}5 \cdot 10^{-4} + 480 \cdot 10^{-4}} = 55 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2\,^\circ\text{C};$$

$$\Lambda_{\text{к}2} = \alpha_{\text{к}2} S_{\text{к}2} = 195 \cdot 10^{-4} \cdot 8000 = 156 \text{ вт/°C};$$

$$\Lambda'_{\text{к}2} = \frac{1}{0{,}00156 + 0{,}0064} = 126 \text{ вт/°C},$$

где

$$R'_{\Delta 2} \approx \frac{0{,}5 h'_2}{k_{\text{Fe}}} \frac{1}{\pi (D - h'_2) l_\text{р}} = \frac{0{,}5 \cdot 8{,}3}{0{,}45 \pi (46 - 8{,}3)\, 50} = 0{,}00156 \text{ °C/вт};$$

$$R_{\text{к}2} = \frac{1}{156} = 0{,}0064.$$

По формулам (144) — (151):

$$\Lambda_{\text{л}1} = 70{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 41\,000 = 281 \frac{\text{вт}}{^\circ\text{C}};$$

$$S_{\text{л}1} = 0{,}6 \cdot 60 \cdot 2 (6 + 1{,}3)\, 77 \approx 4{,}1 \cdot 10^4 \text{ см}^2;$$

$$\Lambda_{\text{л}2} = 141 \cdot 10^{-4} \cdot 3800 \approx 54 \frac{\text{вт}}{^\circ\text{C}};$$

$$S_{\text{л}2} = 3800 \text{ см}^2 \text{ (по чертежу)};$$

$$\Lambda_{ап} = 61 \cdot 10^{-4} \cdot 13\,500 = 82,5 \frac{вт}{°C};$$

$$\alpha'_{ап} = \frac{\alpha_{ап}\alpha_{в}}{\alpha_{ап} + \alpha_{в}} = \frac{70,5 \cdot 480}{70,5 + 480} \cdot 10^{-4} = 61 \cdot 10^{-} \frac{вт}{см^2\,°C};$$

$$S_{ап} \approx \pi 84 \cdot 23,8 + \pi 76,2\,(67,8 - 45) + \frac{\pi}{2}(84^2 - 76,2^2) - 40\,\frac{\pi \cdot 3,88^2}{2} \approx 13\,500 \text{ см}^2 —$$

по (171б) с учетом 40 каналов;

$$\Lambda_{12} = 56 \cdot 10^{-4}\pi \cdot 46 \cdot 50 = 40 \frac{вт}{°C}.$$

По (187)

$$\Lambda_{1в} = \frac{1}{R_{1в}} = \frac{1}{0,00171 + 0,0029 + 0,0002 + 0,0019} = 149 \frac{вт}{°C},$$

где

$$R'_{\Delta 1} \approx \frac{0,5h'_1}{k_{Fe}}\,\frac{1}{\pi(D_п - h'_1)\,l} = \frac{0,5 \cdot 13,6}{0,45 \cdot \pi \cdot 62,6 \cdot 45} = 0,00171 \text{ °C/вт};$$

$$R''_{\Delta 1} = \frac{\Delta_i}{\pi D_п l k_i} = \frac{0,0075}{\pi \cdot 76,2 \cdot 45 \cdot 0,00025} = 0,0029 \text{ °C/вт};$$

$$R_{\Delta} = \frac{\Delta}{\pi D_п l k_{Fe}} = \frac{1,5}{\pi \cdot 76,2 \cdot 45 \cdot 0,7} = 0,0002 \text{ °C/вт};$$

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\pi D_п l \alpha_в} = \frac{10^4}{\pi \cdot 76,2 \cdot 45 \cdot 480} = 0,0019 \text{ °C/вт}.$$

По формулам (176) — (179):

$$\Lambda_{11} = 281 + 40 + 149 + \frac{149 \cdot 281}{82,5 + 181} = 629 \frac{вт}{°C};$$

$$\Lambda_{22} = 54 + 126 + 40 = 220 \frac{вт}{°C};$$

$$\Lambda'_{12} = 40 - \frac{149\,(54 + 126)}{82,5 + 181} = -62 \frac{вт}{°C};$$

$$k_{12} = -\frac{62}{220} = -0,28; \quad k_{21} = \frac{40}{629} = 0,064.$$

Расчет температур.

$$\theta_1 = \frac{13\,265 - 0,28 \cdot 5265}{629 + 0,28 \cdot 40} = 18,4 \text{ °C};$$

$$\theta_2 = \frac{5265 + 0,064 \cdot 13\,265}{220 - 0,064 \cdot 40} = 28,1 \text{ °C};$$

$$\theta_{ai} = 25 + 18,4\,\frac{281}{181 + 82,5} + 28,1\,\frac{54 + 126}{181 + 82,5} = 63,8 \text{ °C};$$

$$\theta_{Cu1} = 18,4 + 13,5 + 12,3 + 63,8 = 108,0 \text{ °C};$$

$$\theta_{i1} = \frac{\varepsilon p_{Cu\,1}\Delta_{i_1}}{0,5 l_{w_1} Z_1 \Pi_1 k_i} = \frac{6730 \cdot 0,3}{122 \cdot 60\,(12 + 2,6) \cdot 0,0014} = 13,5 \text{°C};$$

$$\Delta\theta_{Fe} = \frac{q\,(h'_1)^2}{2k_{Fe}} = \frac{0,09 \cdot 13,6^2}{3 \cdot 0,45} = 12,3° \text{ C},$$

где

$$q = \frac{\varepsilon p_{Fe1}}{V_{Fe}} = \frac{8350}{\left[\frac{\pi}{4}(73,2^2 - 46^2) - 60 \cdot 1,3 \cdot 6,5\right]45} = 0,09 \frac{вт}{см^3}.$$



Перегрев обмотки статора над водой

$$\theta_{Cu\,1} = 108,0 - 25 = 83,0° \text{ C}.$$

По данным измерения $\theta_{Cu\,1} = 83,5°$ C.

По (169)

$$\theta_{Cu\,2} = 28,1 + 17,5 + 63,8 = 114,4° \text{ C},$$

где по (157)

$$\theta_{i2} = p_{2рад} \cdot R_{i2} = 2275 \cdot 0,0077 = 17,5° \text{ C};$$

$$p_{2рад} = 4200\,\frac{64}{64 + 54} = 2275 \text{ вт};$$

$$\Lambda_{рад} = \frac{1}{R_{i2} + R'_{\Delta 2} + R_{к2}} = \frac{1}{0,0077 + 0,00156 + 0,0064} = 64 \frac{вт}{°C};$$

$$R_{i_2} = \frac{\Delta_{i2}}{S_{i2} k_i} = \frac{0,025}{13\,000 \cdot 0,00025} = 0,0077 \frac{°C}{вт}.$$

Измерение по методу термокрасок показывает температуру ротора ≈ 120° C.

## 6-7. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КАТУШЕК ВОЗБУЖДЕНИЯ

В крупных синхронных машинах полюсные катушки (рис. 69) изготовляются из полосовой голой меди. Между витками прокладывается слой миканита или асбеста. Внутренний перепад температуры по ширине такой катушки весьма мал ввиду высокой теплопроводности меди, и поэтому превышение температуры складывается из перепада на поверхности катушки над охлаждающим воздухом $\theta_{11f}$ и среднего превышения температуры воздуха $\theta_{af}$ у катушек над температурой входящего воздуха $\theta^{\circ}_{\delta 1}$, т. е. согласно (107)

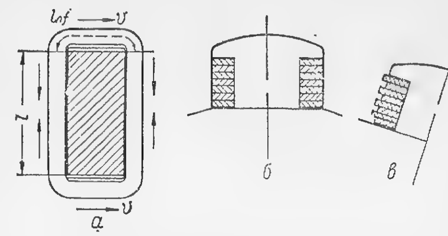



Рис. 69. Однорядные гладкие и ступенчатые катушки:
*а* — вид сверху; *б* — гладкая катушка (вид сбоку); *в* — ступенчатая катушка (вид сбоку)

$$\theta'_{1f} = (\theta_{11f} + \theta_{af1})\,\frac{1}{1 - \beta}, \tag{191}$$

где

$$\theta_{af1} = 0,5\Delta\theta_a\,\frac{p_{f1} + p_v}{\Sigma' p} \approx 0,25\theta_{a1},$$

$$\beta = \frac{\theta_{11f}}{235 + \theta^{\circ}_{\delta 1}}; \quad p_{f_1} = i_f^2 r_{f(\theta = \theta^{\circ}_{\delta 1})}.$$

Перепад температуры $\theta_{11f}$ в соответствии со сказанным может быть определен как средняя величина соответственно рис. 69, *а* и (97)

$$\theta_{11f} = \frac{\theta'_{1f} l + \theta_{1f} l_{лf}}{l + l_{лf}}, \tag{192}$$

где

$$\theta'_{1f} = \frac{p_{fa1}}{\Lambda_f},$$

$p_{fa1}$ — потери в активной части при $\theta^\circ_{Cu} = \theta^\circ_{01}$, т. е. $\theta'_{1f}$ — условный перепад на активной длине и соответственно

$$\theta''_{1f} = \frac{p_{fл1}}{\Lambda''_f} \tag{193}$$

— условный перепад в лобовых частях при $p_{fл1} = p_{f_1} - p_{fa1}$.

Проводимость $\Lambda'_f$ равна

$$\Lambda'_f = \alpha'_f S'_f, \tag{194}$$

где $\alpha'_f$ — коэффициент теплоотдачи в междуполюсном пространстве;

$S'_f$ — поверхность катушек между полюсами; при наличии ступенчатой катушки $S'_f$ увеличивается (рис. 69).

Проводимость

$$\Lambda''_f = \alpha''_f S''_f, \tag{195}$$

где $\alpha''_f$ — коэффициент теплоотдачи лобовых частей катушки;

$S''_f$ — поверхность лобовых частей.

Обыкновенно $\alpha''_f > \alpha'_f$, поэтому удлинение полюсов, т. е. уменьшение величины $\beta = \frac{\tau}{l}$, ведет к ухудшению охлаждения катушек. Коэффициент $\alpha''_f$ может быть рассчитан по (57) или рис. 63. Коэффициент $\alpha'_f$ вообще зависит от средней скорости воздуха между полюсами и, если она известна из опыта или определена из вентиляционного расчета, может быть определен также по кривым (рис. 62) или по уравнению (57). При отсутствии данных о средней скорости воздуха между полюсами можно использовать одно значение $\alpha_f$ для всей поверхности полюсов и внести поправку на длину $k_\beta$ в соответствии с кривыми рис. 62. Пользуясь этими кривыми, можно считать $\theta'_{11f}$ вместо (192) по формуле

$$\theta_{11f} = \frac{p_{f1}}{\alpha_f (S'_f + S''_f) k_\beta}. \tag{196}$$

В многовитковых или многорядных катушках из круглой или квадратной меди расчет может быть произведен аналогично. Необходимо только учесть, что коэффициент теплоотдачи $\alpha_f$ в данном случае меньше и определяется по (57а) или рис. 63, *б*. Кроме того, здесь нельзя уже пренебрегать перепадом температуры по ширине катушки. Согласно (10) этот средний перепад

$$\Delta\theta_i = \frac{1}{12k_x} p_x b_к^2, \tag{197}$$

где для случая катушек, высота сечения меди которых значительно больше ширины, в качестве $p_x$ может быть взят в первом приближении весь удельный поток, т. е. $p_x = s_f^2 \rho$, а $k_x$ согласно уравнению (46)

$$k_x \approx \frac{b_к}{\sum \frac{\Delta_{in}}{k_{in}}} \approx \frac{b_к k_i}{\Sigma \Delta_i}, \tag{198}$$

где $b_к$ — ширина катушки;

$\Sigma\Delta_i$ — суммарная толщина изоляции по ширине катушки;

$k_x$ — коэффициент теплопроводности изоляции катушек в соответствии с табл. 7.



Если теплоотдача с внешней поверхности катушек на 1 *см* осевой длины ($\lambda_{f_1}$) больше, чем с внутренней ($\lambda_{f_2}$), то максимум температуры по сечению катушки будет лежать ближе к внутренней стороне (рис. 70). Положение максимума может быть определено из уравнения (9), если заменить $\theta_{s_1}$ на $\theta_{f_1}$, а $\theta_{s_2}$ на $\theta_{f_2}$.

Как видно из рис. 70, внешняя поверхность $S_1$ отводит только часть общих потерь $p_f$, равную $p_f\gamma$, а внутренняя поверхность $S_2$ остальную часть, т. е. $p_f(1-\gamma)$.

Превышение температур поверхностей $S_1$ и $S_2$ определяется величиной снимаемых потерь и тепловыми проводимостями $\lambda_{f_1}$ и $\lambda_{f_2}$

$$\theta_{f_1} = \frac{p_f\gamma}{\lambda_{f_1}} = p_f \frac{\gamma}{\alpha_{f_1} S_1}; \quad \theta_{f_2} = p_f \frac{1-\gamma}{\lambda_{f_2}} = p_f \frac{1-\gamma}{\alpha_{f_2} S_2}. \tag{199}$$

Приравнивая нулю производную $\frac{d\theta}{dx}$ уравнения (9), находим, что максимум будет при $x = x_1 = \gamma b_к$,

где

$$\gamma = \frac{0{,}5 b_к + \frac{k_x}{\alpha_{f_2}}}{b_к + \frac{k_x}{\alpha_{f_1}} + \frac{k_x}{\alpha_{f_2}}}, \tag{200}$$

$\alpha_{f_1}$ и $\alpha_{f_2}$ — удельные теплоотдачи внутренней и внешней поверхностей; при этом $\alpha_{f_2}$ вычисляется при условии $S_2 = S_1$.

Рис. 70. Многорядные подразделенные катушки.

Максимальный перепад температуры внутри катушки равен

$$\Delta\theta_{max} = \frac{s_f^2 \rho b_к}{8k_x} k_1, \tag{201}$$

где $k_1 = 4\gamma^2 \approx 1{,}5 \div 1{,}7$.

Средний перепад $\Delta\theta_{ср}$ согласно (11) равен 2/3 $\Delta\theta_{max}$.

Максимальная температура при средней температуре охлаждающей среды $\theta^\circ_a$ будет равна

$$\theta^\circ_{max} = \theta^\circ_a + \frac{1}{2}(\theta_{f_1} + \theta_{f_2}) + \Delta\theta_{max} = \theta^\circ_a + 0{,}5 p_f \left(\frac{\gamma}{\lambda_{f_1}} + \frac{1-\gamma}{\lambda_{f_2}}\right) + \Delta\theta_{max}. \tag{202}$$

Приближенно

$$\theta^\circ_{max} \approx \theta^\circ_a + \frac{p_f}{\lambda_{f_1} + \lambda_{f_2}} + \Delta\theta_{max},$$

$$\theta^\circ_{ср} = \theta^\circ_a + \frac{p_f}{\lambda_{f_1} + \lambda_{f_2}} + \frac{2}{3}\Delta\theta_{max}. \tag{203}$$

При подразделенных катушках (рис. 70) к проводимости $\lambda_{f_1} + \lambda_{f_2}$ прибавляется проводимость теплосъема внутри каналов $\lambda_v = \alpha_v S_v$, а при вычислении $\Delta\theta_{max}$ и $\Delta\theta_{ср}$ величина $s_f^2\rho$ умножается на отношение $\frac{\lambda_{f_1}}{\lambda_{f_1} + \lambda_v}$.

Средняя температура охлаждающей среды $\theta^\circ_a$ равна температуре входящего (неподогретого) воздуха плюс средний подогрев воздуха при прохождении его через машину.

## 6-8. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

В масляных трансформаторах с естественной циркуляцией тепло, созданное в железе и в меди, отдается маслу, которое передает тепло окружающему воздуху через стенки бака и радиаторов. Температура обмотки складывается из суммы:

1. Перепада между поверхностью активных материалов и маслом

$$\theta_{11} = \frac{p_{\text{Cu}}}{\alpha_{\text{м}} S_{\text{Cu}}} \text{ и } \theta_{22} = \frac{p_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{м}} S_{\text{Fe}}}, \tag{204}$$

где $\alpha_{\text{м}}$ — коэффициент теплоотдачи от омываемой маслом поверхности к маслу (см. ниже);

$S$ и $p$ — теплоотдающая поверхность и потери в активных материалах.

2. Превышения температуры бака над охлаждающим воздухом

$$\theta_{\text{б. в}} = \frac{p_{\text{Cu}} + p_{\text{Fe}}}{\Delta_{\text{б}}} = \frac{p_{\text{Cu}} + p_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}} S_{\text{л}}}, \tag{205}$$

где $S_{\text{к}}$ и $S_{\text{л}}$ — поверхности конвекции и лучеиспускания бака, $м^2$;

$\alpha_{\text{к}}$ и $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициенты теплоотдачи (см. ниже).

3. Внутреннего перепада температуры в обмотках. В многослойных обмотках из круглого провода в общем случае (рис. 70) согласно формуле (197)

$$\Delta\theta_i = \frac{p_0'(dn)^2}{8k_x} k_1, \tag{206}$$

где $p_0'$ — удельные потери, $вт/см^3$;

$k_x$ — средний коэффициент внутренней теплопроводности

$$k_x = k_i \frac{d}{\Delta_i};$$

$k_i$ — коэффициент теплопроводности изоляции;

$d$ — диаметр провода;

$n$ — число слоев;

$\Delta_i$ — толщина изоляции провода;

$k_1$ — коэффициент, учитывающий ухудшение теплоотдачи одной из сторон. При двух свободных поверхностях охлаждения $k_1 = 1$. В общем случае $k_1$ можно определить по (200) — (201).

Подставляя

$$\rho_{75} = 2{,}1 \cdot 10^{-6}; \; k_x = k_i \frac{d}{\Delta_i};$$

$$k_i = 0{,}0015 \; вт/см°C,$$

получим общую формулу

$$\Delta\theta_i = \frac{s^2\rho}{8} \frac{n^2 d \Delta_i k_1}{k_i} = 1{,}75 \cdot 10^{-4} n^2 d \Delta_i s^2 k_1 °\text{C}. \tag{207}$$

Здесь $s$ — плотность тока, $а/см^2$.

Для пропитанных катушек можно считать $\Delta\theta_i$ вдвое меньшим.



Для одно- или двухслойных катушек из прямоугольного провода

$$\Delta\theta_i = \frac{w \Delta_i a'}{k_i (a + a')}, \tag{208}$$

где $w$ — удельный тепловой поток, $вт/см^2$;

$a$ и $a'$ — размеры голого и изолированного проводов.

4. Перепада температуры от масла к стенке бака или охладителя

$$\Delta\theta_{\text{м. б}} = \frac{p_{\text{Cu}} + p_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{м}} S_{\text{к}}},$$

где обычно $\Delta\theta_{\text{м. б}} \approx 2 \div 3°$C, $S_{\text{к}}$ — полная поверхность соприкосновения масла и бака.

5. Температуры охлаждающего воздуха $\theta°_a$.

Распределение температур по высоте трансформатора приведено на рис. 71.

**Коэффициент теплоотдачи** при естественной конвекции масла зависит от превышения температуры $\theta$ омываемой маслом поверхности над температурой масла: для горизонтальных поверхностей [129]

$$\alpha_{\text{м}} = 38\theta^{1/4} вт/м^2 °C; \tag{209}$$

для вертикальных поверхностей

$$\alpha_{\text{м}} = 48\theta^{1/4} вт/м^2 °C. \tag{210}$$

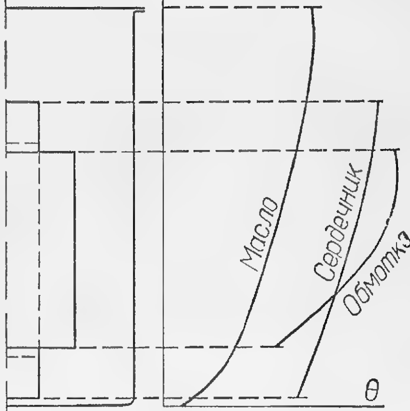



Рис. 71. Распределение температур по высоте трансформатора.

Допустимые удельные тепловые нагрузки для поверхностей, омываемых маслом, находятся в пределах $w = 900 \div 1600$ $вт/м^2$. Согласно [19] коэффициент теплоотдачи зависит в незначительной степени от высоты вертикальной поверхности. Этим влиянием высоты можно пренебречь. Кроме того, с учетом уменьшения вязкости масла с температурой $\alpha_{\text{м}}$ растет быстрее, чем $\theta^{1/4}$. Мы пренебрегаем этим увеличением теплоотдачи, считая его запасом надежности.

Тепловая нагрузка поверхности катушки при двухстороннем охлаждении равна

$$w = \frac{s^2\rho\beta}{2} \; вт/см^2, \tag{211}$$

где $\beta$ — толщина катушки (рис. 72) в направлении распространения теплового потока.

Допустимое значение $w$ определяется перепадом температуры между поверхностью обмотки и маслом.

Для дисковых обмоток [129]

$$\theta = \left(10 + \frac{3}{\delta} + \frac{a}{5{,}5}\right) \left(\frac{w}{1000}\right)^{0{,}8}, \tag{212}$$

где $a$ — радиальный размер катушки ($a > 2$ *см*);
$\delta$ — канал между катушками ($\delta > 0{,}3$ *см*);
$w$ — удельная тепловая нагрузка, *вт/м²*.

При $a < 2$ *см*

$$\theta = \left(10 + 0{,}5 \; \frac{a}{\delta}\right)\left(\frac{w}{1000}\right)^{0{,}8}. \tag{212a}$$

Для прочих обмоток по (204).

Коэффициент теплоотдачи бака при естественной конвекции в воздух [129]

$$\alpha_к = \alpha_{к20}\left(\frac{\theta}{20}\right)^{1/4}, \tag{213}$$

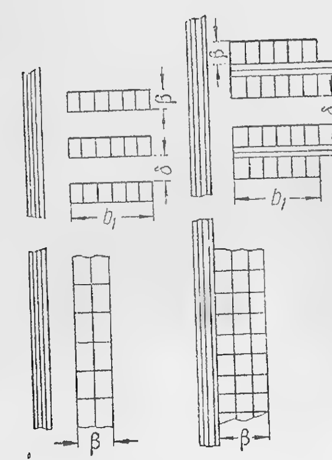


Рис. 72. Расположение обмоток трансформатора.

где

$$\alpha_{к20} \approx 6 \div 7 \; вт/м^2\,°C.$$

Здесь можем пренебречь незначительным влиянием высоты бака на величину $\alpha$.

Теплоотдача через излучение, согласно [98],

$$w = \nu\left[(T_б)^4 - (T_о)^4\right] \; вт/м^2, \tag{214}$$

где $T_б$ и $T_о$ — абсолютные температуры бака и воздуха;
$\nu$ — коэффициент лучеиспускания, зависящий от состояния поверхности и цвета окраски.

Так как $T_б^4 - T_о^4 = (T_б - T_о)\,f(T) = \theta f_1(\theta)$, то можно считать

$$w_л = \theta f_1(\theta)\,\nu,$$

где

$$\nu f_1(\theta) \approx \alpha_л = \alpha_{л20}\left(\frac{\theta}{20}\right)^{1/4}; \; \alpha_{л20} \approx 6 \; вт/м^2\,°C. \tag{215}$$

Как видно из формул, отличие нагрева трансформатора от машины состоит в том, что параметры тепловой цепи трансформатора заметно зависят от температуры и, следовательно, линейность уравнений и метод наложения допустимы со значительно меньшей точностью, чем в машинах. Превышение температуры в трансформаторе растет не прямо пропорционально потерям, а приблизительно пропорционально потерям в степени 0,8.

Таким образом, пересчет превышений температуры при переходе от одной нагрузки ($P_1$) к другой ($P_2$) при постоянном напряжении производится по формуле

$$\theta_2 \approx \theta_1\left[\frac{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 + \frac{1}{\xi_1}}{1 + \frac{1}{\xi_1}}\right]^{0{,}8}, \tag{216}$$



где

$$\xi_1 = \frac{p_{Cu_1}}{p_{Fe_1}};$$

$\theta_1$ — превышение температуры при $P = P_1$.

Для сухих трансформаторов с естественной циркуляцией воздуха можно считать коэффициент теплоотдачи между обмотками и воздухом и между железом и воздухом по (213). Основной перепад равен перепаду температуры между воздухом и активными материалами. Очень строго надо учитывать коэффициенты покрытия поверхностей. Более подробно о расчете сухих трансформаторов см. в [19].

В случае принудительной циркуляции масла или воздуха относительно обмоток и железа или бака коэффициенты теплоотдачи возрастают. Можно считать, что при обдувании бака можно повысить теплоотдачу в 1,5—2 раза без чрезмерных затрат на вентиляцию. Считают, что при обдуве бака необходимо 1,3—1,5 *м³/сек* воздуха на 1 *квт* потерь.

Количество масла при принудительной циркуляции при том же перегреве уменьшается до 40% от его значения при естественной конвекции.

## 6-9. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРЕВЕ

### Нагрев машины как одного тела

Для расчета нестационарного нагрева обыкновенно рассматривают машину в целом, или одну из ее частей, например обмотку якоря, как однородное тело, соответственно уравнению (18).

При кратковременных нагрузках или при коротких замыканиях, когда длительность нагрева значительно меньше постоянной времени $T$, нагрев идет по прямолинейному закону (без учета теплоотдачи). Согласно (18) при $\Delta\theta_{11} = 0$, т. е. при отсутствии внешней теплоотдачи, получаем

$$\frac{d\,\theta_{11}(t)}{dt} = \frac{p}{C}$$

или после интегрирования

$$\theta_{11}(t) = \theta_0 + \frac{p}{C}\,t = \theta_0 + \frac{p}{cG}\,t.$$

Если потери в меди $p = s^2\rho\,\dfrac{G_{Cu}}{\gamma_{Cu}}$, то

$$\theta_{11}(t) - \theta_0 = \Delta\theta = \frac{s^2\rho'}{\gamma c}\,t.$$

Подставляя плотность тока в *а/см²*, $\rho' = \rho_{75} = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *омсм*, $c = 390$ *дж/кг°C*, $\gamma_{Cu} = 0{,}0089$ *кг/см³*, получаем

$$\Delta\theta = \frac{s^2 t}{160 \cdot 10^4}$$

или, если $s$ в *а/мм²*,

$$\Delta\theta = \frac{s^2}{160}\,t = \frac{s_N^2}{160}\,k^2 t, \tag{217}$$

где $k = \frac{I}{I_N}$ — кратность эффективного тока перегрузки или тока короткого замыкания;

$s_N$ — номинальная плотность тока.

Пусть, например, $s_N = 5$ *а/мм²* и $k = 10$, тогда

$$\Delta\theta = \frac{25 \cdot 100}{160} t = 15{,}5\, t, \text{ т. е. } 15{,}5^\circ\text{C в 1 сек.}$$

При заданном графике нагрузки, когда потери $p$ являются известной функцией времени $p = p(t)$ при небольших отношениях «времени работы» к постоянной времени нагрева, можно исходить из известных методов средних потерь или эквивалентного тока. Учет влияния постоянной времени может быть произведен по [97].

Пусть задан график (рис. 73) с продолжительностью рабочего промежутка

$$ПВ = \frac{a}{t_ц} = \varepsilon.$$

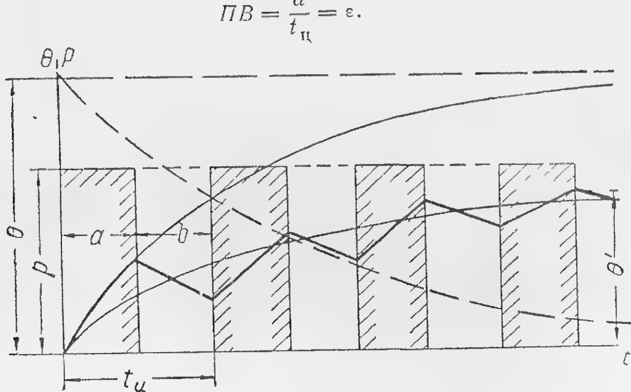



Рис. 73. Кривая нагрева при повторно-кратковременной нагрузке.

При включении постоянной нагрузки $p$ превышение температуры изменялось бы по закону

$$\theta(t) = \theta\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}}, \tag{218}$$

где $\theta_0$ — начальное превышение температуры (при $t = 0$);

$\theta$ — установившееся значение (при $t = \infty$).

При переменной нагрузке с $ПВ = \varepsilon$ установившееся превышение температуры $\theta'$ будет меньше $\theta$, соответствующего постоянной нагрузке ($ПВ = 100\%$), в отношении

$$\frac{\theta'}{\theta} = \frac{e^{\frac{a}{T}} - 1}{e^{\frac{a}{T}} - e^{-\frac{b}{T_0}}} = \frac{1}{\beta}, \tag{219}$$

где $T_0$ — постоянная времени при остывании ($T_0 \approx 2 \div 5T$).

Если $a \ll T$ и $b \ll T_0$, то

$$\frac{\theta'}{\theta} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{1 + \frac{b}{a}\frac{T}{T_0}}. \tag{220}$$

Следовательно, при той же температуре нагрузка в рабочий период может быть увеличена в $\beta$ раз.

Это обстоятельство дает также возможность выбора мощности машины при заданной величине $ПВ$.



В самом общем случае *при любом графике нагрузки* и, следовательно, при заданных потерях $p = f(t)$ превышение температуры может быть определено из общего решения (18) путем графического или аналитического интегрирования:

при $T = \text{const}$

$$\theta = e^{-\frac{t}{T}} \int_0^t \frac{1}{C} p(t)\, e^{\frac{t}{T}} dt; \tag{221}$$

при $T = f(t)$

$$\theta = e^{-\int_0^t \frac{dt}{T}} \int_0^t \frac{1}{C} p(t)\, e^{\int_0^t \frac{dt}{T}} dt. \tag{222}$$

Достаточную точность дает уравнение (221) и при переменном $T$, если пользоваться его *средним значением*.

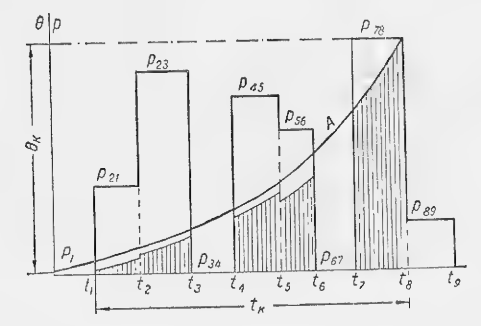



Рис. 74. Определение максимальной температуры при переменной нагрузке.

Графическое интегрирование (221) можно упростить, если график нагрузки разбить на промежутки $t_1$, $t_2 - t_1$, $t_3 - t_2$ и т. д. (рис. 74), в течение которых потери можно принять постоянными и равными соответственно $p_1$, $p_{21}$, $p_{23}$ и т. д. (при этом некоторые из этих величин могут быть равны нулю). Если теплоотдача в течение этих промежутков может быть принята неизменной и равной среднему значению, то получим

$$\theta(t) = e^{-\varphi(t)}\left[\int_0^{t_1} \frac{p_1}{C} e^{\varphi(t)} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_2}{C} e^{\varphi(t)} dt + \dots\right], \tag{223}$$

где

$$\varphi(t) = \left[\frac{1}{t}\int_0^t \alpha(t)\, dt\right] t = \alpha_t t; \quad \alpha_t = \frac{1}{t}\int_0^t \alpha(t)\, dt = \frac{1}{T}.$$

При $p = p_{78} = \text{const}$ было бы $\theta = \theta_к$; при $p = \text{var}$ $\theta = \frac{S}{S_A}\theta_к$,

где $S_A$ — площадь между экспонентой $e^{-\frac{t}{T}}$ и осью абсцисс;

$S$ — заштрихованная площадь, полученная пересчетом ординат экспоненты в отношении

$$\frac{p_{67}}{p_{78}}, \frac{p_{56}}{p_{78}} \text{ и т. д.}$$

Нагрев при пуске и торможении двигателей. Из уравнения разгона

$$J\frac{d\omega}{dt} = M - M_в = \Delta M \tag{224}$$

получаем время пуска или торможения

$$dt = \frac{1}{M - M_в} J d\omega, \qquad (225)$$

где $M$ — электромагнитный момент двигателя;
$M_в$ — внешний момент, приложенный к валу;
$\Delta M$ — ускоряющий (или тормозной) момент.

Вводя инерционную постоянную

$$T_i = \frac{J\omega_1}{M_N'} = \frac{GD^2}{4g}\frac{\omega_1^2\, 9,81}{P_N} = 2,74\, GD^2 \frac{n_1^2(об/мин)}{P_N\,(ква)}\, 10^{-6}\ сек., \qquad (226)$$

получим

$$t = T_i \int_{\omega_a}^{\omega} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{\Delta \boldsymbol{M}(\boldsymbol{\omega})} = T_i \int_{s}^{s_a} \frac{dt}{\Delta \boldsymbol{M}(s)}, \qquad (227)$$

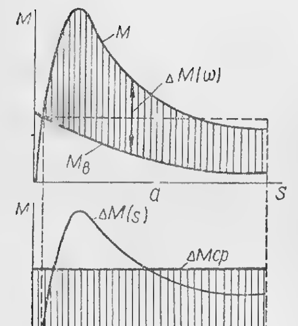


Рис. 75. Кривые изменения момента при пуске:
а — ускоряющий момент; б — средний ускоряющий момент за время пуска.

где $\boldsymbol{\omega}$ и $\Delta \boldsymbol{M}$ — относительные скорости и моменты:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{\omega}{\omega_1}; \quad \Delta \boldsymbol{M} = \frac{\Delta M}{M_N'};$$

$M_N'$ — единичный момент (§11-15);
$s$ — скольжение.

При пуске пределы интегрирования $\omega_a = 0\ (s_a = 1)$, $\omega = \omega_b \approx \omega_1\ (s_b = 0)$. При торможении $\omega_a = -\omega_1$, $\omega_b = 0$, $s_a = 2$, $s_b = 1$.

Величина $\Delta M(\boldsymbol{\omega})$ обычно известна из графика (рис. 75, *а* и *б*), и кривую $\boldsymbol{\omega} = f(t)$ можно определить графически.

Вместо графического построения иногда можно определить $\boldsymbol{\omega} = f(t)$ приближенным аналитическим методом.

Первым приближением по (227) при пуске является кривая

$$t = T_i \frac{1}{\Delta \boldsymbol{M}_{ср}} \boldsymbol{\omega}, \text{ или } \boldsymbol{\omega} = \frac{\Delta \boldsymbol{M}_{ср}}{T_i} t. \qquad (228)$$

Время пуска по (228)

$$t_п = T_i \frac{1}{\Delta \boldsymbol{M}_{ср}} \boldsymbol{\omega}_1 = T_i \frac{1}{\Delta \boldsymbol{M}_{ср}}, \text{ так как } \boldsymbol{\omega}_1 = 1. \qquad (229)$$

При торможении

$$t = T_i \frac{1}{\Delta \boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega}_1) = T_i \frac{1}{\Delta \boldsymbol{M}}\, \boldsymbol{\omega} + 1); \quad \boldsymbol{\omega} = \frac{t}{T_i}\Delta \boldsymbol{M} - 1. \qquad (230)$$

Полное время торможения

$$t_т = T_i \frac{1}{\Delta \boldsymbol{M}_т}, \qquad (231)$$

где $\Delta \boldsymbol{M}_т$ — средний относительный тормозной момент

$$\Delta \boldsymbol{M}_т = \left(\frac{M - M_т}{M_N'}\right)_{ср}. \qquad (232)$$

Можно принять, что потери, выделяемые в роторе за время пуска, имеют некоторую постоянную эффективную величину

$$p_{2\,пуск} = k p_{2\,max} = k I_{2\,пуск}^2 r_2 m_2, \qquad (233)$$

где $I_{2\,пуск}$ — максимум вторичного тока при пуске;
$r_2$ — сопротивление ротора на фазу;
$m_2$ — число фаз;
$k$ — коэффициент ($<1$); по данным [112] $k \approx (0,7 - 0,8)$.



Считая постоянную нагрева обмотки ротора неизменной и равной минимальному значению $T_{min}$ [см. уравнение (272)], получим превышение температуры в конце пуска $t = t_{пуск}$

$$\theta(t) = \theta\left(1 - e^{-\frac{t_{пуск}}{T_{min}}}\right), \qquad (234)$$

где

$$\theta = \frac{p_{2\,пуск}}{\Lambda_0}.$$

Если после пуска машина работает при нагрузке с потерями $p_{ср}$ за время $t$ и затем снова происходит пуск и т. д., то расчет температуры может быть произведен по графику (рис. 73) и формуле (219) как для повторно-кратковременной нагрузки.

Совершенно аналогично можно рассчитать и температуру обмотки статора.

Определение постоянных времени обмоток статора и ротора произведено ниже.

## Нагрев машины как двух тел

Рассмотрение нестационарного нагрева машины как одного тела по (18) в подавляющем большинстве случаев практически допустимо, так как опыт показывает, что кривая нагрева обмотки и железа в наиболее важной области близка к эквивалентной экспоненте, т. е. к (21). Расхождение обычно получается в начале нагрева, так как в действительности машина представляет $n$ тел, и нагрев каждого тела определяется системой $n$ уравнений вида (21).

Таким образом, каждое тело нагревается по закону

$$\theta(t) = a_1\left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) + a_2\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) + \ldots + a_n\left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right). \qquad (235)$$

Как показывают расчеты, постоянные быстро убывают с возрастанием $n$.

Практически остаются заметными две-три постоянные. Последнее обстоятельство, между прочим, доказывает справедливость рассмотрения машины как двух-трех однородных тел.

В некоторых случаях важно исследовать нестационарный нагрев более точно. Тогда необходимо решить систему уравнений (27) для двух или трех тел. Мы удовлетворимся решением системы для двух тел.

Решим сначала следующую задачу.

Пусть к двум телам *1* и *2*, например меди обмотки (индекс «1») и железу (индекс «2»), имеющим при $t = 0$ установившиеся превышения температуры $\theta_{10} = 0$ и $\theta_{20} = 0$, приложены потери $p_1$ и $p_2$, остающиеся после $t = 0$ постоянными. Найдем закон изменения превышений $\theta_1$ и $\theta_2$ в функции времени. Установившиеся значения превышений при $t = \infty$ были подробно исследованы для системы двух тел; при этом

$$\theta_1 = \frac{p_1 + k_{12}p_2}{\Lambda_1'} = \frac{w_1 + k_{12}w_2}{a_1'}, \qquad (236)$$

$$\theta_2 = \frac{p_2 + k_{21}p_1}{\Lambda_2'} = \frac{w_2 + k_{21}w_1}{a_2'}. \qquad (237)$$

Общее решение системы уравнений (27) будет, как известно, суммой установившихся значений, найденных по (236) и (237), и *свободных*, найденных из решения системы (27) без правой части.

Запишем эту систему символически, подставляя $\gamma = \frac{d}{dt}$,

$$\left.\begin{aligned} (C_1\gamma + \Lambda_1 + \Lambda_{12})\,\theta_1(t) - \Lambda_{12}\theta_2(t) &= p_1 \\ -\Lambda_{21}\theta_1(t) + (C_2\gamma + \Lambda_2 + \Lambda_{21})\,\theta_2(t) &= p_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (238)$$

откуда

$$\theta_1(t)=\frac{(C_2\gamma+\Lambda_2+\Lambda_{21})\,p_1+\Lambda_{12}p_2}{\Delta(\gamma)};\qquad(239)$$

$$\theta_2(t)=\frac{(C_1\gamma+\Lambda_1+\Lambda_{12})\,p_2+\Lambda_{21}p_1}{\Delta(\gamma)},\qquad(240)$$

где $\Delta(\gamma)$ — определитель системы;

$$\Delta(\gamma)=(C_1\gamma+\Lambda_1+\Lambda_{12})(C_2\gamma+\Lambda_2+\Lambda_{21})-\Lambda_{12}\Lambda_{21}.\qquad(241)$$

Подстановка в (238) $\gamma=\frac{d}{dt}=0$ даст уравнения стационарного режима, т. е. $\theta_1$ и $\theta_2$, рассмотренные выше.

Решение системы в общем виде может быть найдено либо операторным, либо классическим методом. В данном случае последний оказывается проще. Согласно этому методу общее решение системы (238) дает

$$\left.\begin{aligned}\theta_1(t)&=A_1(1-e^{-\alpha_1 t})+B_1(1-e^{-\alpha_2 t})\\ \theta_2(t)&=A_2(1-e^{-\alpha_1 t})+B_2(1-e^{-\alpha_2 t})\end{aligned}\right\}.\qquad(242)$$

Постоянные $A_1$, $B_1$ и $A_2$, $B_2$ найдутся из начальных условий:

при $t=\infty$ $\theta_1(t)=\theta_1$, $\theta_2(t)=\theta_2$;

при $t=0$ $\frac{d\theta_1(t)}{dt}=\frac{p_1}{C_1}$ и $\frac{d\theta_2(t)}{dt}=\frac{p_2}{C_2}$.

Отсюда получаем

$$A_1+B_1=\theta_1 \quad\text{и}\quad A_2+B_2=\theta_2;$$

$$B_1=\frac{p_1/C_1-\alpha_1\theta_1}{\alpha_2-\alpha_1}\quad\text{и}\quad B_2=\frac{p_2/C_2-\alpha_2\theta_2}{\alpha_2-\alpha_1}.\qquad(243)$$

Уравнения нагрева меди и железа будут

$$\left.\begin{aligned}\theta_1(t)&=\theta_1(1-e^{-\alpha_1 t})+B_1(e^{-\alpha_1 t}-e^{-\alpha_2 t})\\ \theta_2(t)&=\theta_2(1-e^{-\alpha_1 t})+B_2(e^{-\alpha_1 t}-e^{-\alpha_2 t})\end{aligned}\right\}.\qquad(244)$$

Декременты $\alpha_1$ и $\alpha_2$ представляют собой корни с обратным знаком определителя системы (238) при $\Delta(\gamma)=0$.

Постоянные времени равны

$$T_1=\frac{1}{\alpha_1}=-\frac{1}{\gamma_1}\quad\text{и}\quad T_2=\frac{1}{\alpha_2}=-\frac{1}{\gamma_2}.\qquad(245)$$

Развертывая (241) и сокращая $\Lambda_{12}\Lambda_{21}$, а затем поделив все члены на $\Lambda_1'\Lambda_2'$, получаем уравнение, удобное для определения корней

$$T_1'T_2'\gamma^2+\gamma(T_1'+T_2')\,k+k=0.\qquad(246)$$

Здесь введены условные постоянные времени и постоянная $k$, легко определяемые из расчета и имеющие простой физический смысл, а именно:

$$T_1'=\frac{C_1}{\Lambda_1'}=\frac{c_1}{p'_{N_1}}\theta_{N_1}\qquad(247)$$

— постоянная нагрева, которую имело бы одно первое тело ($C_1=c_1G$) с полной теплоемкостью $C_1$ при теплоотдаче, равной эквивалентной теплоотдаче от первого тела воздуху.

Постоянная, которую имело бы одно второе тело, при теплоотдаче $\Lambda_2'$ соответственно эквивалентной схеме (рис. 56, *в*)

$$T_2'=\frac{C_2}{\Lambda_2'}=\frac{c_2}{p'_{N_2}}\theta_{N_2}.\qquad(248)$$

При $c_2=c_1=400$ *дж/кг°С*, $p_2'=8$ *вт/кг*, $p'_{N_2}=40$ *вт/кг*, $\theta_{N_1}=\theta_{N_2}=40$°С получаем

$$T_1'=400\ \text{сек. и}\ T_2'=2000\ \text{сек.}$$



Постоянная, характеризующая тепловую связь тел,

$$k=\frac{\Lambda_1+\Lambda_{12}}{\Lambda_1'}=\frac{\Lambda_2+\Lambda_{21}}{\Lambda_2'}=\frac{1}{1-k_{12}k_{21}}=\frac{1}{\sigma_T}.\qquad(249)$$

Предельный случай бесконечно большой тепловой проводимости между телами приводит к величине $k=\infty$ и уравнение (246) будет иметь:

первый корень

$$\gamma_1=-\frac{2\alpha_1'\alpha_2'}{\alpha_1'+\alpha_2'}=-\frac{1}{T_1},\qquad(250)$$

где

$$\alpha_1'=\frac{1}{T_1'};\qquad \alpha_2'=\frac{1}{T_2'};$$

второй корень

$$\gamma_2=\infty,\ \text{т. е. } T_2=0.$$

Решение квадратного уравнения (246) дает два корня

$$\gamma_1=-\frac{k(\alpha_1'+\alpha_2')}{2}\left[1-\sqrt{1-\frac{4\alpha_1'\alpha_2'}{k(\alpha_1'+\alpha_2')^2}}\right]=$$

$$=-\frac{k(\alpha_1'+\alpha_2')}{2}[1-\delta],\qquad(251)$$

где

$$\delta=\sqrt{1-\frac{4\alpha_1'\alpha_2'}{k(\alpha_1'+\alpha_2')^2}}\qquad(252)$$

и

$$\gamma_2=-\frac{k(\alpha_1'-\alpha_2')}{2}[1+\delta].\qquad(253)$$

Постоянные времени

$$T_1=-\frac{1}{\gamma_1};\ T_2=-\frac{1}{\gamma_2}.\qquad(254)$$

Как видно, $T_1$ будет большая постоянная (основная) и $T_2$ — малая. Произведем общую оценку их величин.

Постоянная $k$ может быть легко определена из уравнения (29) для стационарного нагрева и по (249), в которой величины $k_{12}$ и $k_{21}$ могут быть определены как из расчета, так и из опыта согласно (41), т. е.

$$k_{12}=\frac{\theta_{1o}p_{1\text{к}}}{p_{2o}\theta_{1\text{к}}}\quad\text{и}\quad k_{21}=\frac{\theta_{2\text{к}}p_{2o}}{p_{1\text{к}}\theta_{2o}}.$$

Индексы «о» и «к» означают «холостой ход» и «короткое замыкание». Если в среднем принять

$$\frac{\theta_{1o}}{\theta_{1\text{к}}}\approx\frac{1}{2};\ \frac{p_{1\text{к}}}{p_{2o}}\approx 1,\ \frac{\theta_{2\text{к}}}{\theta_{2o}}\approx 1,$$

то $k_{12}k_{21}=0{,}5$ и по (249) $k=2$.

Отношение постоянных согласно (247) и (248) равно

$$\frac{\alpha_1'}{\alpha_2'}=\frac{\Lambda_1'C_2}{\Lambda_2'C_1}=\left[\frac{p_1}{\theta_1}\right]_{p_2=0}\cdot\left[\frac{\theta_2}{p_2}\right]_{p1=0}\frac{C_2}{C_1}.\qquad(255)$$

Если принять отношения $\frac{\theta_{2o}}{\theta_{1\text{к}}}=1$ и $\frac{p_1}{p_2}=1$, то

$$\frac{\alpha_1'}{\alpha_2'}=\frac{T_2'}{T_1'}=\frac{C_2}{C_1},\qquad(256)$$

т. е. условные постоянные времени относятся как полные теплоемкости.

При этих условиях из (254) получим постоянные времени

$$T_1 \approx \frac{1}{\alpha_1' + \alpha_2'} \cdot \frac{1}{1-\delta} \approx T_2' \tag{257}$$

[так как из (252) при $C_2 \approx 3\, C_1$ $\delta$ изменяется в пределах $0,7 \div 0,8$].

Из свойства корней квадратного уравнения, а также (253) получаем

$$T_2 \approx \frac{T_1'}{k} = \frac{T_1'}{T_2'} \frac{T_2'}{k} = \frac{\alpha_2'}{\alpha_1'} \frac{T_2'}{k} \approx \frac{C_1}{C_2} \frac{T_2'}{k}, \tag{258}$$

т. е. вторая постоянная времени получается в шесть-семь раз меньше первой. Первая же (основная) постоянная, как видно, близка к значению постоянной времени железа якоря, рассчитанной как для одного тела по (248).

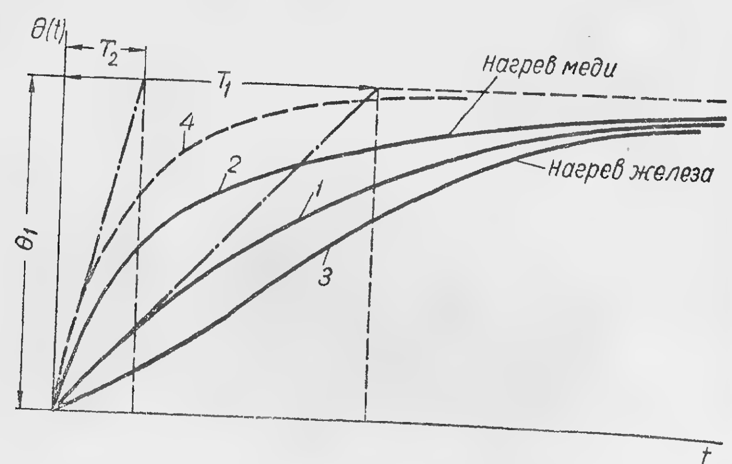



Рис. 76. Закон нагревания меди и железа:
1 — экспонента; 2 — кривая нагрева меди; 3 — кривая нагрева железа; 4 — экспонента по (263).

Весьма важно отметить также, что малая постоянная времени $T_2$, определяющая нагрев меди, получается меньше $T_1'$ в $k$ раз. При этом $T_1' \approx T_{Cu}$ по (24).

Вводя постоянные

$$\alpha_1' = \frac{1}{T_1'} = \frac{\Lambda_1'}{C_1} \quad \text{и} \quad \alpha_2' = \frac{1}{T_2'} = \frac{\Lambda_2'}{C_2},$$

получим

$$B_1 = \frac{\frac{T_1}{T_1'}\theta_{11} - \theta_1}{\frac{T_1}{T_2} - 1}; \quad B_2 = \frac{\frac{T_1}{T_2'}\theta_{20} - \theta_2}{\frac{T_1}{T_2} - 1}. \tag{259}$$

Так как для меди согласно сказанному

$$\frac{T_1}{T_1'} = \frac{T_1}{T_2'} \frac{T_2'}{T_1'} \approx \frac{C_2}{C_1} = 3 \div 4,$$

то величина $B_1$ всегда положительна и равна приблизительно

$$B_1 = \frac{(3 \div 4)\,\theta_{11} - \theta_1}{(6 \div 7) - 1};$$

$$B_2 \approx -\frac{\theta_2 - \theta_{20}}{(6 \div 7) - 1}. \tag{260}$$



Обычно $\theta_1$ составляет от $\theta_{11}$ до $1,5\,\theta_{11}$; при этом

$$B_1 = (0,4 \div 0,5)\,\theta_1 \quad \text{и} \quad B_2 \approx (0,1 \div 0,2)\,\theta_2.$$

Таким образом, получаем уравнение кривой нагрева меди для данного примера изолированных якорных обмоток

$$\theta_1(t) \approx \theta_1 \{(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + 0,5\,(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}})\}. \tag{261}$$

Для железа

$$\theta_2(t) = \theta_2 \{(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) - 0,2\,(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}})\}. \tag{262}$$

Кривые (261) и (262) представлены на рис. 76.

Полученный результат легко объясняется физически. В начале нагрева, благодаря наличию теплового сопротивления изоляции, греется одна медь, а затем начинается передача тепла железу. Наоборот, железо греется соответственно кривой 3, так как получает тепло от меди спустя некоторое время. На рис. 76 показана также кривая (пунктир)

$$\theta_1(t) = \theta_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_2}}), \tag{263}$$

из которой для простоты расчета можно считать нагрев меди. При этом согласно (258) эквивалентная постоянная равна $(0,4 \div 0,5)\,T_1'$, где $T_1' = \frac{C_1}{\Lambda_1'}$ в соответствии с (247).

## Нагрев пусковой клетки при пуске или торможении

Вопрос о расчете нагрева клетки представляет весьма большую сложность, так как необходимо совместно учитывать нагрев клетки и нагрев объема железа ротора, окружающего клетку. Закон нагрева этого пространства во времени получится в результате решения уравнения нестационарной теплопроводности с частными производными. Мы рассмотрим предельные случаи.

1. Слой стержней обмотки, ограниченный с одной стороны железом бесконечной протяженности (с другой стороны теплоотдача отсутствует).

В этом случае нагрев железа ротора в месте соприкосновения стержня, согласно [149], во времени изменяется по закону

$$\theta(t) = \frac{2w}{\sqrt{\pi}\, k_{Fe} c} \sqrt{t}, \tag{264}$$

т. е. изменяется пропорционально $\sqrt{t}$.

Здесь $w$ — удельный тепловой поток от стержня к железу, причем

$$w = sA\rho = s_N A_N \rho k_A^2 = \frac{p_{2п}}{\pi D' l}; \tag{265}$$

$s_N$ — номинальная плотность тока, $а/см^2$;
$A_N$ — номинальная линейная нагрузка, $а/см$;
$\rho$ — удельное сопротивление $омсм$ [при ожидаемой $\theta(t)$];
$k_A$ — кратность тока по отношению к номинальному;
$D'$ — диаметр ротора по центру стержней;
$k_{Fe}$ — коэффициент теплопроводности вдоль листов;
$c$ — объемная теплоемкость, $дж/см^3 {}^\circ C$.

При теплопроводности железа $k_{Fe} = 0,75$ $вт/см^\circ C$ и теплоемкости $c \approx 4$ $дж/см^3 {}^\circ C$ получим

$$\theta(t) = 0,65\, w \sqrt{t}. \tag{266}$$

2. Обмотка, ограниченная с одной стороны конечным слоем железа, с высотой спинки $h$ при коэффициенте теплоотдачи с поверхности спинки, равном $\infty$, и при теплоотдаче в зазор, равной нулю, нагревается по закону

$$\theta(t) = \theta\left\{1 - \frac{8}{\pi^2}\left(\frac{e^{-\frac{t}{T}}}{1} + \frac{e^{-\frac{9t}{T}}}{9} + \frac{e^{-\frac{25t}{T}}}{25} + \ldots\right)\right\}. \qquad (267)$$

Постоянная времени равна

$$T = \frac{4}{\pi^2}\frac{h^2 c}{k} = \frac{4}{\pi^2}\frac{4}{0{,}75}h^2 = 2{,}17\,h^2 \text{ сек.} \qquad (268)$$

В этом случае обмотка нагревается по экспоненциальному закону с бесконечным рядом убывающих экспонент.

3. Обмотка, охлаждаемая с поверхности якоря (с другой стороны бесконечно протяженное пространство железа). В этом случае

$$\theta(t) = \theta\left\{1 - e^{-\frac{t}{T}}\left[1 - \Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{c\,k}}\sqrt{t}\right)\right]\right\} = \theta\left\{1 - e^{-\frac{t}{T}}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{t}{T}}\right)\right]\right\}, \qquad (269)$$

где $\Phi$ — интеграл вероятности Гаусса (рис. 77).

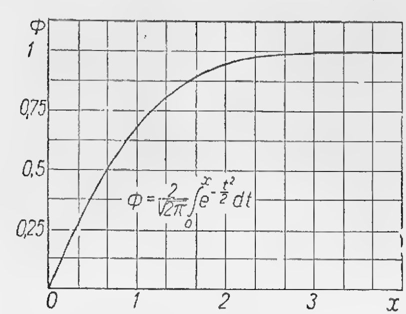



Рис. 77. Интеграл вероятности.

Постоянная времени

$$T = \frac{ck}{\alpha^2}. \qquad (270)$$

Так, например, при $\alpha = 0{,}02$ *вт/см²°С*, $c = 4$ *дж/см³°С* и $k = k_{Fe} = 0{,}7$ *вт/см°С* получим $T = 7500$ сек. *

Когда $\alpha \to 0$, а $T \to \infty$, то $\theta \to \frac{2w\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k_{Fe} c}}$, т. е. к выражению (264).

Указанные предельные случаи дают возможность по существу лишь оценить эквивалентную постоянную времени нагрева окружающей стержни среды, т. е. железа ротора. Нагрев самих стержней зависит еще от теплового сопротивления воздушной прослойки между стержнями и железом.

4. Обмотка и железо ротора могут рассматриваться как два тела. При этом эквивалентная постоянная нагрева клетки может быть определена из уравнений (238)

$$C_1\frac{d\theta_1(t)}{dt} + \Lambda_1\theta_1(t) + \Lambda_{12}[\theta_1(t) - \theta_2(t)] = p_1; \qquad (271)$$

$$C_2'\frac{d\theta_2(t)}{dt} + \Lambda_2\theta_2(t) + \Lambda_{21}[\theta_2(t) - \theta_1(t)] = p_2,$$

где $p_1$ — потери в клетке при пуске или торможении;
$\Lambda_1$ — проводимость от клетки непосредственно к воздуху (т. е. главным образом от колец);
$\Lambda_{12}$ — проводимость воздушной прослойки между стержнями и железом;
$\theta_2(t)$ — превышение температуры у поверхности железа пазов клетки;
$\theta_1(t)$ — превышение температуры клетки;
$C_1$ — теплоемкость клетки;
$\Lambda_2$ — проводимость от железа к воздуху.

* Эта постоянная имеет лишь условное значение, так как кривая нагрева неэкспоненциальна.



Приблизительная картина нагрева ротора в сечении $AA$ представлена на рис. 78.

Теплоемкость железа $C_2'$ представляет эквивалентную переменную теплоемкость, приведенную к температуре у поверхности $\theta_2$.

При $t \to 0$ $C_2' \to 0$, при $t \to \infty$ $C_2' \to C_2$.

Решая уравнения для крайних значений $\Lambda_2$ и $C_2'$, можно найти приблизительный закон нагрева стержней.

Первое крайнее положение будет тогда, когда теплоемкость железа равна нулю, т. е. $C_2' = 0\,(t = 0)$; в этом случае из уравнений (271) получаем *одну экспоненту*, что справедливо для малых значений $t$, т. е.

$$\theta_1(t) = \theta_1\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \to \theta_1\frac{t}{T_2} = \frac{p_1}{C_1}t,$$

где $\theta_1$ — условное превышение

$$\theta_1 = \frac{p_1}{\Lambda_1'} = \frac{p_{2п}}{\Lambda_1'}.$$

Условная постоянная времени при этом будет минимальна, т. е.

$$T_2 = T_{\min} = \frac{C_1}{\Lambda'} = T_{Cu}. \qquad (272)$$

Второе предельно крайнее значение

$$C_2' = C_2;\; T_2 = T_{\max} = \frac{C_2}{\Lambda_2}. \qquad (273)$$

При этих условиях согласно (242) и (261)

$$\theta_1(t) = \theta_1\left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) + B_1\left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}\right), \qquad (274)$$

Рис. 78. Распределение температуры в сечении $AA$ ротора в различные моменты времени

где

$$\theta_1 = \frac{p_1 + k_{12}p_2}{\Lambda_1'};$$

$p_1 = p_{2пуск}$ — потери в обмотке ротора;
$p_2$ — потери в железе ротора при пуске.

Две постоянные времени соответствуют двум телам (стержни, железо ротора).

Для случая, когда $\Lambda_{12} = \infty$ (непосредственный тепловой контакт стержня и железа ротора), получаем

$$T_2' = \frac{c_2 G_2}{\Lambda_2'} \approx \frac{c_2\pi D^2 l\gamma\left(1 - \frac{D_i^2}{D^2}\right)}{4\alpha_\delta \pi D l} = \frac{c_2 D\gamma}{4\alpha_\delta}\left(1 - \frac{D_i^2}{D^2}\right). \qquad (275)$$

В формуле (275) средняя теплоемкость $c_2 = 400$ *дж/кг°С*, $\gamma = 7{,}9\cdot 10^{-3}$ *кг/см³*, $D_i$ — внутренний диаметр ротора, в *см*.

При крупных якорях с высотой ярма ротора $h_{j2}$ (*см*)

$$T_2' \approx \frac{140\,h_{j2}}{1 + 0{,}05\,v_a} \text{ сек.} \qquad (276)$$

При учете теплового сопротивления воздушной прослойки $k_i$ (т. е. при $k_i \neq \infty$) $T_2'$ и $T_1'$ уменьшаются в отношении $\frac{\xi}{1+\xi}$; $\xi = \frac{k_i}{\Delta_i \alpha_\delta}$.

Как видно, $T_1'$ и $T_2'$ мало зависят от мощности и составляют величины порядка $T_1' \approx 100$ сек., $T_2' \approx 1000$ сек. Принимая во внимание сказанное о величинах $T_1$ и $T_2$, получим

$$T_2 \approx 0{,}5T_1' \text{ и } T_1 \approx T_2'; \; B_1 = 0{,}5.$$

Уравнение нагрева клетки

$$\theta_1(t) = \theta_1 \left[\left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) + 0{,}5\left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}\right)\right]$$

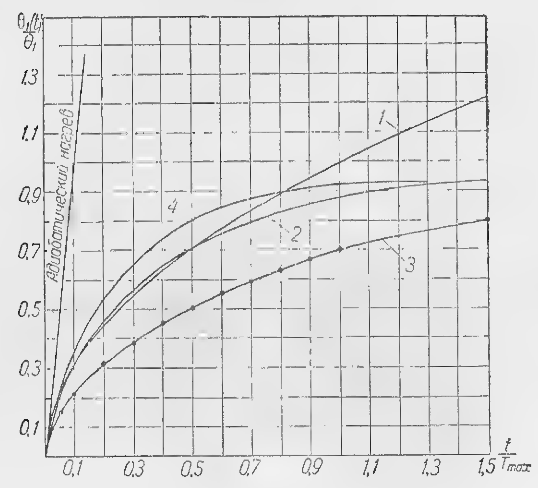



Рис. 79. Кривые нагрева клетки при пуске:
*1, 2, 3, 4* — кривые, соответствующие различным методам расчета.

или грубо приближенно

$$\theta_1(t) = \theta_1\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{277}$$

На рис. 79 для сравнения показаны кривые нагрева, построенные:

а) кривая *1* — по уравнению (264). Так нагревалась бы обмотка при отсутствии теплового сопротивления воздушной прослойки между стержнями ($\Lambda_{12} = \infty$) и при бесконечно большой массе ротора;

б) кривая *2* — по (267);

в) кривая *3* — по (269);

г) кривая *4* — по (261).

---

*Глава седьмая*

# РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ

## 7-1. ОБЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАДАЧИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА

Выделяющиеся при работе электрической машины потери требуют непрерывного теплоотвода. Охлаждающей средой может быть газ (воздух, водород), или жидкость (масло, его заменители, вода).

Отвод тепла от электрической машины посредством потока воздуха или водорода называется вентиляцией машины.

Вентиляция электрических машин является наиболее распространенным способом теплоотвода. По способу создания потока газа электрические машины могут быть разделены на 4 группы:

1) машины с естественной вентиляцией;

2) машины с самовентиляцией — имеющие вентиляторы, насаженные на вал, или заменяющие их устройства;

3) машины с независимой (принудительной) вентиляцией — поток газа продувается через машину внешним вентилятором;

4) машины с наружной вентиляцией (внешним обдувом).

Машины с независимой вентиляцией имеют то преимущество, что они могут охлаждаться с практически одинаковой интенсивностью как при вращающемся, так и при неподвижном роторе.

Вентиляция может быть протяжная, когда воздух прогоняется через машину и выбрасывается затем в окружающее пространство, и замкнутая, когда в машине циркулирует один и тот же объем воздуха, прогоняемый через охладитель с проточной водой.

По конструкции вентиляционных путей внутри машины системы вентиляции разделяются на радиальную (рис. 80 и рис. 50), аксиальную (рис. 81 и рис. 49) и смешанную. (К машинам со смешанной системой вентиляции можно отнести машины постоянного тока, имеющие радиальные каналы в якоре и вентилятор, а также специфическую для турбогенераторов многоструйную систему вентиляции (рис. 257) и др.).

Развитая поверхность каналов и удобство их выполнения, использование напора вращающихся частей, равномерное охлаждение по длине машины при радиальной системе вентиляции составляют ее преимущества. Вместе с тем при этой системе увеличивается осевая

длина машины, снижается жесткость железа статора вследствие деформации пакетов и дистанционных распорок, выпучивается изоляция паза в каналы, что является причиной пробоя обмотки на корпус.

При этой системе имеют место весьма значительные потери напора при входе в каналы, повышенные вентиляционные и добавочные потери, низкая удельная теплоотдача в каналах вследствие малой скорости воздуха, неравномерного его распределения по каналам и пониженной теплоотдачи изолированной поверхности радиальных каналов. Кроме того, имеется дополнительный перепад температуры вследствие малой теплопроводности поперек пакетов.

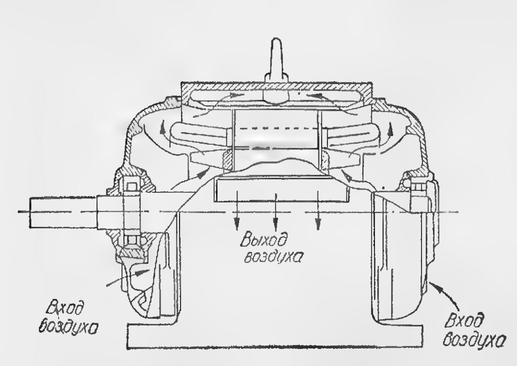
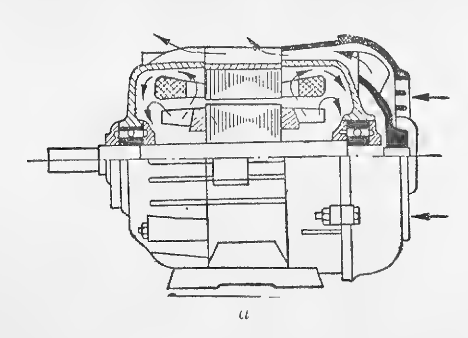



Рис. 80. Асинхронный двигатель серии *А* с радиальной самовентиляцией.

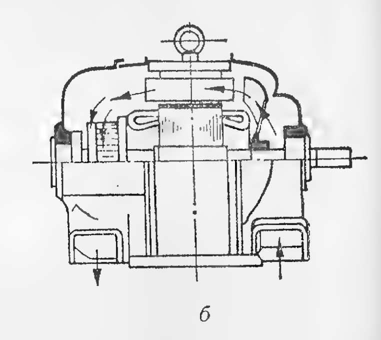
Аксиальная система имеет следующие преимущества:

1) малые потери напора, а следовательно, и малые вентиляционные потери в особенности при применении осевого вентилятора с повышенным к. п. д.;

2) большая удельная теплоотдача поверхностей аксиальных каналов, поверхностей спинки и расточки. Особенно эффективным является аксиально-винтовое движение воздуха.



*а*



*б*

Рис. 81. Машины с аксиальной вентиляцией:

*а* — асинхронный двигатель серии АОЛ с внешней аксиальной нагнетательной самовентиляцией и внутренней радиальной циркуляцией воздуха; *б* — машина постоянного тока с аксиальной нагнетательной самовентиляцией.

К недостаткам следует отнести неравномерность охлаждения по длине машины, вследствие чего затрудняется применение этой системы для длинных машин, в особенности при значительных размерах ярма (рост перепада температуры по высоте ярма).

Выбор той или иной системы вентиляции представляет специальную задачу.



Вентиляционный расчет производится после того, когда решены вопросы о конструктивном типе и системе вентиляции (закрытый защищенный, открытый тип), а также о свойствах применяемого охлаждающего агента (воздух, водород, вода и пр.). Другими словами, предполагается, что исходная конструкция выбрана. При этих условиях основными задачами вентиляционного расчета являются:

1. Проверка правильности предварительного выбора системы вентиляции.
2. Обеспечение вентиляционным устройством заданного расхода воздуха или другого агента через машину в соответствии с формулой (81) гл. 5 и (63) гл. 6 при заданном допустимом его перегреве.
3. Наиболее эффективное распределение расхода охлаждающей среды по вентиляционной системе, чтобы получить максимальный теплосъем при минимальных вентиляционных потерях.
4. Обеспечение минимума потерь напора в каналах путем улучшения их аэродинамических свойств.
5. Конструирование вентилятора в соответствии с данной системой с максимально возможным к. п. д. при высокой механической надежности его работы.
6. Обеспечение минимума потерь, не зависимых от расхода воздуха (завихрение, трение ротора о воздух и пр.).

## 7-2. РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Задача расчета вентиляции состоит в определении количества воздуха по отдельным вентиляционным каналам машины и в определении напора, обеспечивающего заданное количество воздуха. Знание расходов воздуха необходимо для определения скоростей воздуха и теплоотдачи вентилируемых поверхностей.

В основе расчета лежит известное уравнение движения газа по трубопроводу (уравнение Бернулли)

$$H = H_1 + \frac{\gamma}{2g} v_1^2 = H_2 + \frac{\gamma}{2g} v_2^2 + h_{12}, \tag{1}$$

где $H_1$ — статическое давление, *кг/м²* (1 *кг/м²* = 1 *мм* вод. ст.), или «статический напор» в каком-либо сечении *1* (потенциальная энергия на единицу объема);
$v_1$ — скорость, *м/сек*, в сечении *1*;
$\gamma$ — плотность газа;
$H_2$, $v_2$ — то же, в сечении *2*;
$H$ — полный напор;
$h_{12}$ — потеря напора между сечениями *1* и *2*.

При $h_{12} = 0$ получаем уравнение движения «идеальной» жидкости или газа.

$\frac{\gamma}{2g} v_1^2$ и $\frac{\gamma}{2g} v_2^2$ представляют «динамические напоры» в сечениях *1* и *2*, т. е. кинетическую энергию единицы объема.

Рассмотрим движение газа по вентиляционной системе рис. 82. На пути движения газа создаются потери напора $h$: 1) на вход воздуха $h_{вх}$, 2) на трение газа $h_т$, 3) на повороты $h_{пов}$, 4) на сужения и расширения $h_{суж}$, $h_{расш}$ и 5) на выход $h_{вых}$. Таким образом, проход по одному каналу от входа газа до выхода дает сумму потерь напора

$$\sum h_1 = h_{вх} + h_т + h_{пов} + h_{суж} + h_{расш} + h_{вых}. \qquad (2)$$

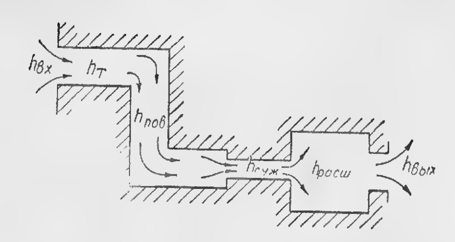


Рис. 82. Схема воздухопровода.

Как показывает опыт, потери напора пропорциональны квадрату скорости воздуха или динамическому напору

$$h = \xi\frac{\gamma}{2g}v^2 = \zeta v^2, \qquad (3)$$

где

$$\zeta = \xi\frac{\gamma}{2g} = \frac{1,2}{2\cdot 9,81}\xi = 0,062\xi.$$

Коэффициенты $\xi_{вх}$ и $\zeta_{вх}$ зависят от формы и характера входного отверстия (рис. 83):

для выступающих краев [1] $\xi_{вх} = 0,7—1$ ($\zeta_{вх} = 0,0434—0,062$); для прямоугольных краев $\xi_{вх} = 0,5$ ($\zeta_{вх} = 0,03$); для закругленных

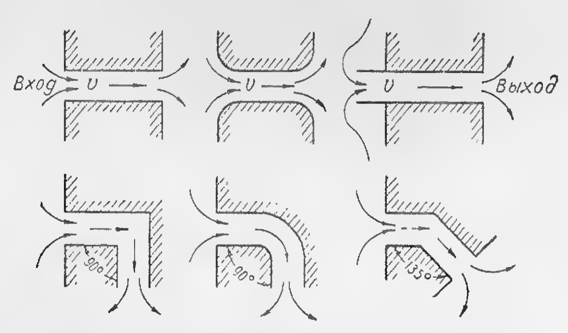


Рис. 83. Различные формы входных и выходных отверстий и поворотов.

краев $\xi_{вх} = 0,2 — 0$ ($\zeta_{вх} = 0,012 — 0$). Коэффициент $\zeta_т = 0,00625\frac{l}{d}$ для шероховатых каналов (выштампованных в железе) и $\zeta_т = 0,00155\frac{l}{d}$ для гладких каналов, причем $d$ — эквивалентный диаметр сечения (при прямоугольном сечении со сторонами $a \times b$ $d = 2\frac{ab}{a+b}$).

По [141]

$$h_т = 37\,500\frac{l}{r^5}\left(\frac{V}{i}\right)^2, \qquad (3а)$$

где $V$ — расход через $i$ параллельных каналов, $м^3/сек$.



При $vS_i i = V$ получим

$$\zeta_т = \frac{h_т}{v^2} = 37\,500\frac{l}{r^5}S_i^2,$$

где $l$ — длина канала, $см$;

$r = \frac{d}{2}$ — гидравлический радиус, $см$;

$S_i$ — сечение канала, $м^2$.

Коэффициенты $\zeta_{пов}$ зависят от угла поворота: $\zeta_{пов} \approx 0,16\left(1 - \frac{\alpha}{180}\right)$.

Коэффициенты сужения и расширения могут быть вычислены по формуле

$$\frac{\gamma}{2g}\xi(v_n - v_{n-1})^2 = \frac{\gamma}{2g}\xi v_{n+1}^2\left[\frac{S_{n+1}}{S_n} - 1\right]^2 = \left(1 - \frac{S_n}{S_{n+1}}\right)^2 v_n^2\frac{\gamma}{2g},$$

т. е.

$$\xi_{суж} = \left(\frac{S_{n+1}}{S_n} - 1\right)^2.$$

При этом надо брать отношение большего сечения $S_{n+1}$ к меньшему $S_n$. Более точно $\zeta_{суж}$ и $\zeta_{расш}$ находятся по рис. 84.

Все коэффициенты сопротивления $\zeta_{суж}$ или $\zeta_{расш}$ зависят также от *формы сечения воздухопровода*. Однако это обстоятельство следует учитывать лишь при высоких скоростях или уточненных расчетах.

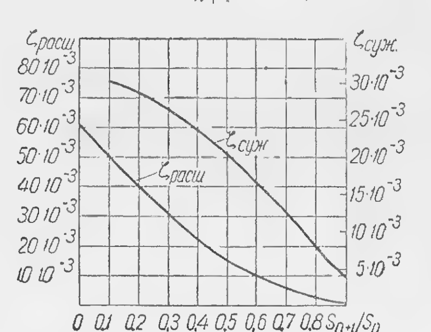


Рис. 84. Коэффициенты сопротивления расширений и сужений канала.

Если газ проходит через решетку с отношением свободного сечения к полному $k_0 = 0,5$, то $\zeta = 0,03$, в частности для проволочных сеток при $k_0 = 0,6$ $\zeta \approx 0,036$.

Потеря напора при выходе в атмосферу равна $\frac{\gamma}{2g}v_{вых}^2$.

Для одного канала имеем согласно уравнениям (1), (2), (3)

$$\sum h = \sum_1^n \zeta_n v_n^2 = \sum\frac{\zeta_n}{S_n^2}V_1^2 = Z_1V_1^2, \qquad (4)$$

где $V_1$ — расход воздуха через канал;

$v_n = \frac{V_1}{S_n}$ — скорость в сечении $S_n$.

Величина

$$Z_1 = \sum_1^n\frac{\zeta_n}{S_n^2} = \sum_1^n Z_n \qquad (5)$$

характеризует «сопротивление» данной ветви воздухопровода и называется ее *аэродинамическим сопротивлением*.

Расход и разность давлений у входа и выхода ветви связаны, следовательно, соотношением

$$H = H_{вх} - H_{вых} = V_1^2 Z_1. \quad (6)$$

Эта разность давлений $H_{вх} - H_{вых}$ должна быть покрыта полезным напором вентилятора.

Аэродинамическое сопротивление ветви складывается из суммы последовательно включенных сопротивлений, например, из

$$Z_{вх} = \frac{\zeta_{вх}}{S^2_{вх}}; \; Z_т = \sum_n \frac{\zeta_{тn}}{S^2_n}; \; Z_{пов} = \sum \frac{\zeta_{пов}}{S^2_{пов}}. \quad (7)$$

Таким образом, при последовательном соединении аэродинамических сопротивлений они складываются арифметически.

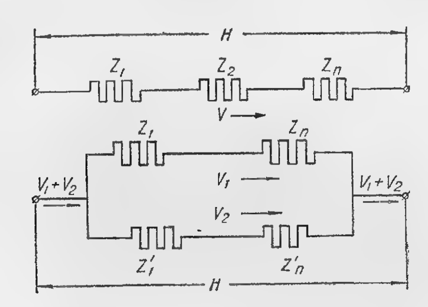



Рис. 85. Эквивалентные схемы воздухопровода.

При параллельном соединении отдельных воздухопроводов, поскольку напор для всех их один и тот же, а сумма расходов равна полному расходу,

$$\sqrt{\frac{H}{Z}} = \sqrt{\frac{H}{Z_1}} + \sqrt{\frac{H}{Z_2}} + \dots + \sqrt{\frac{H}{Z_k}}, \quad (8)$$

откуда

$$\frac{1}{\sqrt{Z}} = \frac{1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{1}{\sqrt{Z_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{Z_k}}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет найти эквивалентное аэродинамическое сопротивление $Z$ любого числа параллельных воздухопроводов через их сопротивления $Z_1$, $Z_2$, $Z_k$.

Эквивалентные схемы последовательного и параллельного соединения аэродинамических сопротивлений представлены на рис. 85.

Определив аэродинамические сопротивления отдельных участков, составляем схему замещения и упрощаем ее.

Схема замещения после ее упрощения может иметь самую различную конфигурацию.

Наиболее простая схема замещения (I тип) получается у машин постоянного тока, имеющих аксиальную вентиляцию, и у синхронных явнополюсных машин, не имеющих вентиляторов (рис. 86). На этой схеме:



$H$ — полезный напор, развиваемый ротором синхронной машины, работающим как вентилятор (или напор, создаваемый вентилятором);

$Z_э$ — эквивалентное аэродинамическое сопротивление всей цепи воздухопровода.

В случае параболической характеристики вентилятора (центробежные вентиляторы с радиальными лопатками, роторы синхронных машин с явновыраженными полюсами, роторы с радиальными вентиляционными каналами и т. п.)

$$H = H_0 - Z_в V^2,$$

где $H$ — полезный напор вентилятора;

$H_0$ — полезный напор при нулевой производительности;

$Z_в$ — аэродинамическое сопротивление вентилятора;

$V$ — производительность или расход вентилятора.

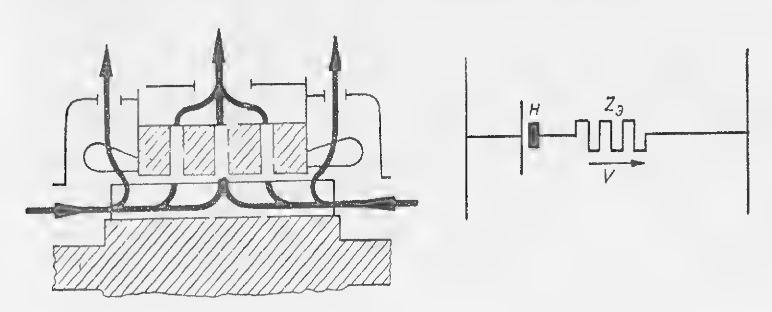



Рис. 86. Вентиляционная схема синхронной машины и соответствующая схема замещения.

Аэродинамическое сопротивление вентилятора может быть вынесено в эквивалентное сопротивление.

Тогда

$$Z_э = Z_{вн} + Z_в,$$

где $Z_{вн}$ — аэродинамическое сопротивление внешнего воздухопровода.

В этом случае расход может быть весьма просто определен аналитически из уравнения

$$V = \sqrt{\frac{H_0}{Z_{вн} + Z_в}}$$

или графически по пересечению характеристик воздухопровода и вентилятора (рис. 87).

В общем случае при параболической и непараболической внешней характеристике вентилятора необходимо на общем графике построить характеристику вентилятора $H = f(V)$ и характеристику воздухопровода $H = Z_{вн}V^2 = f(V)$.

Расход и напор определяется точкой пересечения этих графиков. На рис. 88 приведена примерная характеристика осевого вентилятора ЦАГИ и определен расход для двух различных венти-

ляционных систем (воздухопроводов) с аэродинамическими сопротивлениями $Z_1$ и $Z_2$.

Ко II типу схем замещения могут быть отнесены вентиляционные системы асинхронных машин с радиальной вентиляцией, не имеющих специальных вентиляторов, и с раздельными потоками

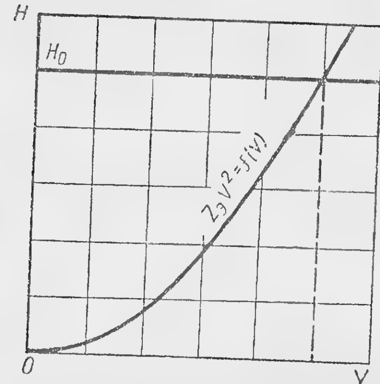



Рис. 87. Определение расхода воздуха.

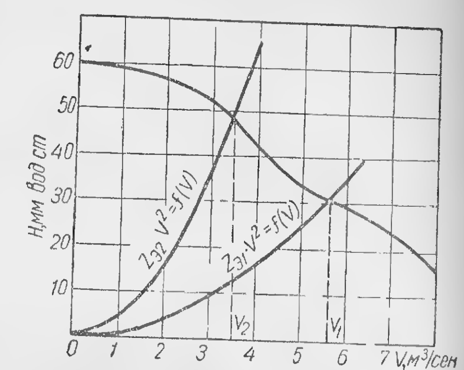
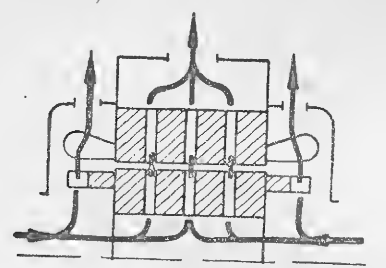



Рис. 88. Характеристики воздухопроводов и вентилятора.

воздуха через активную и лобовую части (вариант «*а*»), или машины, имеющие общий выход воздуха из активной и лобовых частей (вариант «*в*»).



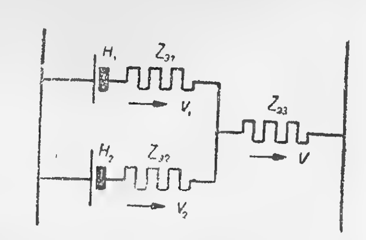



Рис. 89. Вентиляционная схема и схема замещения (вариант «*а*»).

Вентиляционная схема машины и соответствующая ей схема замещения приведены на рис. 89.

Схема замещения варианта «*а*» соответствует параллельной работе двух вентиляторов с различными характеристиками, причем каждый из них имеет свой участок воздухопровода с соответствующими сопротивлениями: вентилятор с $H_1$ — сопротивление $Z_{э1}$, с $H_2$—$Z_{э2}$.

После участков $Z_{э1}$ и $Z_{э2}$ оба вентилятора работают на общий участок воздухопровода $Z_{э3}$.

Для этой схемы:

$$V = V_1 + V_2; \qquad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= Z_{э1} V_1^2 + Z_{э3} V^2 \\ H_2 &= Z_{э2} V_2^2 + Z_{э3} V^2 \end{aligned} \right\}. \qquad (11)$$



Аналитическое решение этих уравнений сложно, поэтому приходится решать задачу графически (рис. 90).

Для этого строим на общем графике зависимости

$$H_1 - Z_{э1} V^2 = f_1(V) \quad \text{и} \quad H_2 - Z_{э2} V^2 = f_2(V).$$

Суммируя абсциссы этих характеристик, получаем суммарную характеристику двух параллельно работающих вентиляторов, и по пересечению ее с зависимостью $Z_{э3} V^2 = f_3(V)$ находим общий расход $V$.

Проводим из точки $A$ линию, параллельную оси абсцисс. По пересечению ее с графиками $H_1 - Z_{э1} V^2 = f_1(V)$ и $H_2 - Z_{э2} V^2 = f_2(V)$ (точки $C$ и $B$) определяем расходы $V_1$ и $V_2$. Решение схемы варианта «*в*» (рис. 91) аналогично, только строится суммарная характеристика трех параллельно работающих вентиляторов.

Рис. 90. Графическое определение количества воздуха, проходящего по отдельным участкам схемы замещения (вариант «*а*»).

Вентиляционные системы синхронных машин, имеющие соединения между камерой лобовых частей и камерой горячего воздуха (пространством над спинкой статора) и выход в окружающую

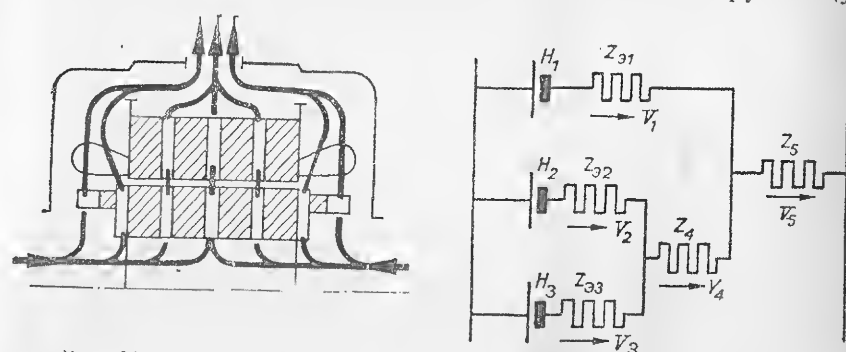



Рис. 91. Вентиляционная схема и схема замещения (вариант «*в*»).

среду как из камеры лобовых частей, так и из камеры горячего воздуха (рис. 92), относятся к III типу схем замещения.

К IV типу могут быть отнесены вентиляционные системы асинхронных машин, имеющие соединения между камерой лобовых частей и камерой горячего воздуха и выходы в окружающую среду из камер лобовых частей и из камеры горячего воздуха (рис. 93).

Вентиляционные системы машин постоянного тока, а также асинхронных машин, имеющих смешанную систему вентиляции (рис. 94), могут быть отнесены к V типу.

Решение схем III, IV и V типов более сложно и выходит за рамки данной книги.*

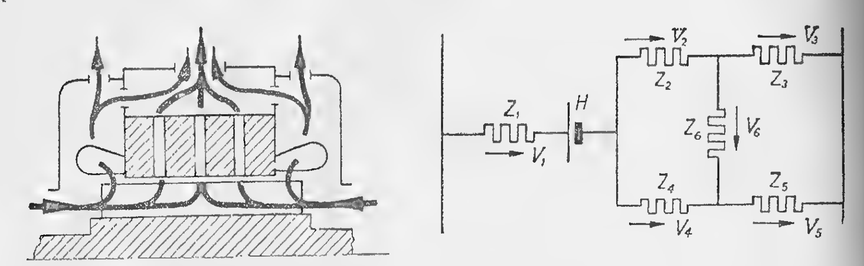



Рис. 92. Вентиляционная схема и схема замещения (III тип).

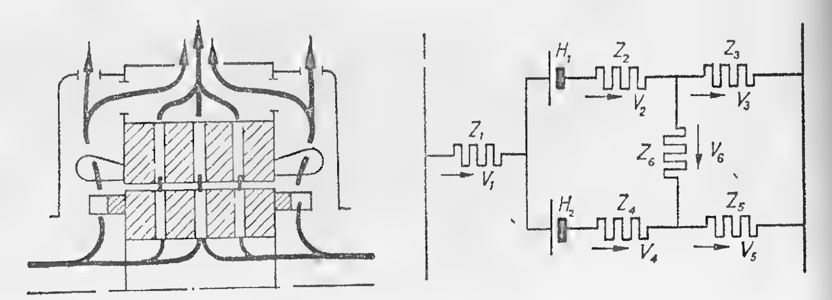



Рис. 93. Вентиляционная схема и схема замещения (IV тип).

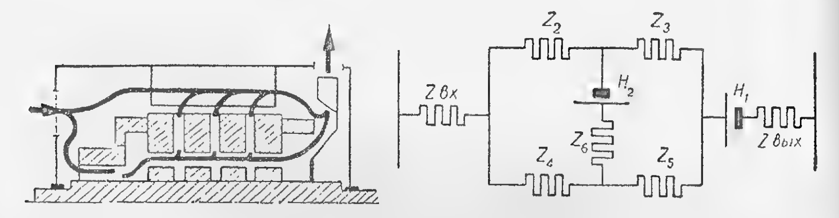



Рис. 94. Вентиляционная схема и схема замещения (V тип).

## 7-3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Теоретический напор $H_t$, развиваемый центробежным вентилятором, состоит из центробежного напора $\frac{\gamma}{2g}(u_2^2 - u_1^2)$, статического напора $\frac{\gamma}{2g}(w_1^2 - w_2^2)$, динамического напора при входе $\frac{\gamma}{2g}v_1^2$, который необходимо вычесть из суммы центробежного и статического напоров, чтобы получить статический напор над атмосферным давлением, и динамического напора при выходе $\frac{\gamma}{2g}v_2^2$, т. е.

$$H_t = \frac{\gamma}{2g}\left[(u_2^2 - u_1^2) + (w_1^2 - w_2^2) + (v_2^2 - v_1^2)\right] \qquad (12)$$

или

$$H_t = \frac{\gamma}{g}\left[u_2 v_2 \cos(v_2 u_2) - u_1 v_1 \cos(v_1 u_1)\right], \qquad (13)$$

если из треугольников скоростей при входе и выходе (рис. 95) выразить $w$ через $v$ и $u$ (формула Эйлера).

* Подробное решение см. Иванов Ю. С., НИС КПИ, 1959.



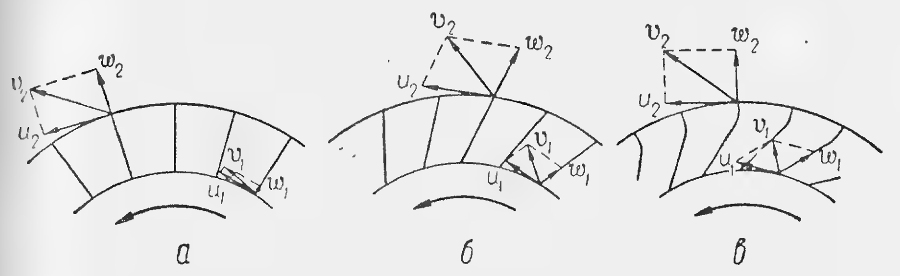



Рис. 95. Различные типы лопаток вентиляторов:
*а* — радиальные; *б* — наклонные назад; *в* — вентилятор с повышенным к.п.д.

Здесь $u_1$ и $u_2$ — окружная скорость лопатки у входа и у выхода; $v_1$ и $v_2$ — абсолютная скорость воздуха у входа и у выхода; $w_1$ и $w_2$ — относительная скорость у входа и у выхода.

Теоретический напор частично расходуется на потери в самом вентиляторе $h_v$, частично составляет статический напор $H$ и частично — динамический напор при выходе из вентилятора

$$H_t = H + h_v + \frac{\gamma}{2g}v_2^2. \qquad (14)$$

При закрытом воздухопроводе, когда производительность (расход) $V$ вентилятора равна нулю, создается максимальный статический напор (рис. 96)

$$H_0 = H_{t0} - h_{v0} - \frac{\gamma}{2g}v_{20}^2. \qquad (15)$$

Отношение

$$\frac{H_0}{H_t} = \eta_0 \qquad (16)$$

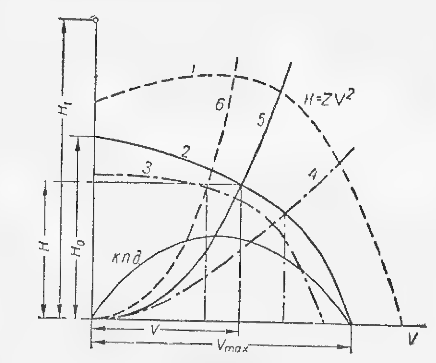



Рис. 96. Характеристики вентиляторов и вентиляционных систем:
*1* — для вентилятора с лопатками, наклоненными вперед; *2* — для вентилятора с радиальными лопатками; *3* — для вентилятора с лопатками, наклоненными назад; *4*, *5*, *6* — характеристики системы для различных аэродинамических сопротивлений.

характеризует потери в вентиляторе при нулевом расходе, $h_{v0}$ и $v_{20}$ — потеря напора и скорость выхода при нулевом полезном расходе.

При изменении производительности или расхода вентилятора напор изменяется согласно кривым *1, 2, 3*, приведенным на рис. 96. Рост напора в начале кривой у вентилятора с лопатками, отогнутыми вперед (кривая *1*), объясняется увеличением $H_t$ в этого рода вентиляторах. При некоторой величине расхода через вентилятор его потери возрастут настолько, что статический напор будет равен нулю. Эта точка соответствует работе вентилятора в открытом пространстве. Производительность вентилятора при этом будет максимальной.

По данным [1]

$$V_{max} = ku_2S_2, \tag{17}$$

где

$$S_2 = 0{,}92\pi D_2 b, \tag{18}$$

$b$ — ширина лопаток;

$k$ — 0,42, 0,5 и 0,35 соответственно для радиальных лопаток, лопаток с наклоном вперед и с наклоном назад.

Уравнение для $H$ приближенно выражается в виде

$$H \approx H_0\left[1 - \left(\frac{V}{V_{max}}\right)^2\right]. \tag{19}$$

На рис. 96 нанесены также характеристики вентиляционных систем (воздухопроводов) с разными величинами сопротивлений.

Уравнения характеристик

$$H = V^2Z, \tag{20}$$

т. е. они представляют параболы. Пересечение этих характеристик с характеристикой вентилятора по уравнению (19) дает величину расхода газа через систему, действительный напор и к. п. д. Этот расход должен соответствовать заданному по (63) гл. 6. Аэродинамический и полный к. п. д. вентилятора будет

$$H = \eta_a H_0, \quad \eta_a = \frac{H}{H_0} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{H}{H_t}. \tag{21}$$

Аэродинамический к. п. д. характеризует потери в вентиляторе при прохождении полезного расхода $V$, полный к. п. д. характеризует все потери вентилятора.

Для вентилятора с радиальными лопатками (кривая 2, рис. 96) теоретический напор из (13)

$$H_t = \frac{\gamma}{g}(u_2^2 - u_1^2), \tag{22}$$

так как $v_2\cos(v_2u_2) = u_2$ и $v_1\cos(v_1u_1) = u_1$.

Действительный напор при нулевом расходе соответственно (21)

$$H_0 = \eta_0 H_t = \eta_0\frac{\gamma}{g}(u_2^2 - u_1^2). \tag{23}$$

Согласно [1] для вентилятора с радиальными лопатками $\eta_0 \approx 0{,}6$, с лопатками, наклоненными вперед, $\eta_0 = 0{,}75$ и с лопатками, наклоненными назад, $\eta_0 = 0{,}5$.



По Циганеку [141] полезный напор равен

$$H = 0{,}122\frac{u_2v_{u_2}}{1+p} - h_v - h_d, \tag{23a}$$

где

$$p = \frac{2(1{,}2 + \sin\beta_2)\sin\beta_2}{n_л\left[1 - \left(\frac{D_1'}{D_2'}\right)^2\right]};$$

$$1{,}2 + \sin\beta_2 < 2;$$

$$v_{u_2} = u_2 - \frac{V\ м^3/сек}{0{,}91\ \mathrm{tg}\,\beta_2 n_л \pi r^2};$$

$$r = \frac{ab}{a+b}\ (\text{см. рис. 99});$$

$n_л$ — число лопаток.

Рис. 97. Явновыраженные полюса.

При отсутствии диффузора потери на трение и вход в вентилятор

$$h_v = 0{,}05\,v_{u_1}^2,$$

а потери при выходе

$$h_d = 0{,}05\left(\frac{v_{u_2}}{1+p}\right)^2.$$

В машинах с большим диаметром, в которых высота лопатки весьма мала по сравнению с радиусом ротора, как например в роторах гидрогенераторов, расчет $H_0$ по формуле (23) дает сильно преуменьшенные значения, так как к напору лопаток добавляется напор явновыраженных полюсов и напор боковых поверхностей ротора. Если полагать, что воздух поступает к лопаткам, имея скорость $0{,}5u_1$, то в данном случае

$$H_0 = \eta_0\frac{\gamma}{g}[u_2^2 - (0{,}5u_1)^2]. \tag{24}$$

Вентилирующее действие роторов можно учесть приблизительно, если считать полюс за «радиальную лопатку» с высотой $h_m$, толщиной $b_p$ и шириной $l_p$ (рис. 97).

В роторах асинхронных машин распорки вентиляционных каналов и лобовые части работают приблизительно, как радиальные лопатки.

Мощность, расходуемая на вентилятор,

$$p_{v_1} = 9{,}81\,\frac{VH}{\eta} = 9{,}81\,VH_t. \qquad (25)$$

Значения $\eta$ изменяются от 0,2 до 0,4.

Максимум к. п. д. получится при расходе

$$V = (0{,}4 - 0{,}5)\,V_{max}. \qquad (26)$$

Если характеристика системы лежит ниже или выше оптимальной, необходимо изменить конструкцию вентилятора или системы в желаемом направлении, т. е. уменьшить или увеличить аэродинамическое сопротивление системы или изменить напор вентилятора. Повышение к. п. д. вентилятора возможно:

а) уменьшением потерь напора при входе и выходе, т. е. осуществлением «безударного входа» и уменьшением скорости выхода, что можно сделать, применяя специальные лопатки (рис. 95, *в*);

б) полезным использованием части динамического напора при выходе, превращая его в статический (установка диффузора, уменьшающего скорость выхода $v_2$ и по уравнению (14) увеличивающего $H$).

Распределение скоростей и давлений в вентиляционной системе. При исследовании вентиляции обыкновенно измеряют при помощи анемометра или термоанемометра и трубки Пито скорости и давления в наиболее важных местах вентиляционной системы. Такими местами являются: 1) вентиляционные каналы в железе статора; 2) лобовые части (камера давления), 3) вход в вентилятор, 4) выход из вентилятора, 5) выход из каналов в камеру горячего воздуха, 6) вход в охладители, 7) выход из охладителей.

Особый интерес при расчете представляет распределение статического и динамического напоров по длине машины в воздушном зазоре и в лобовых частях. Из рис. 50 можно сделать вывод, что если воздух рассматривать как «идеальную жидкость», то статический напор должен возрастать по мере приближения к центру машины и, следовательно, расход через центральные каналы должен быть больше, чем через крайние. В отдельных случаях, однако, кривая давлений может иметь вид, приведенный на рис. 50 (кривая *2*). В этих случаях расход через центральные каналы уменьшен, что может явиться причиной повышенного перегрева центральной части машины. Вероятные причины падения давления: а) чрезмерно большие потери напора на пути от вентилятора до центра машины, б) параллельная работа вентиляторов, насаженных с двух сторон машины, и полюсов, работающих как вентиляторы (см. ниже), в) несимметрия вентиляции (неравенство напоров с двух сторон машины).

Последовательная и параллельная работа вентиляторов. При последовательном включении вентиляторов проходит один и тот же расход газа, а суммарный напор равен сумме напоров отдельных вентиляторов. При параллельной работе результирующий расход равен сумме расходов отдельных вентиляторов. Так как вращающиеся полюса работают как параллельный вентилятор (с плохой характеристикой) вместе с лопатками, то в отдельных случаях они могут ухудшать вентиляцию машины и может оказаться выгодным не ставить специальных вентиляторов с торцовых частей машины, но развить вентилирующее действие полюсов (например устройством вентиляционного канала в середине полюсов, снабженного распорками, которые работают как лопатки вентилятора) или, наоборот, дать возможность работать только лопаткам и совершенно прекратить подвод воздуха через ротор.

Первое мероприятие, вероятно, выгодно в коротких машинах большого диаметра, а второе — в длинных быстроходных машинах относительно малого диаметра.



Упрощенные методы расчета вентиляции. Общий расход воздуха

$$V = V_а + V_л, \qquad (27)$$

где $V_л$ — расход через лобовую часть. Для синхронных явнополюсных машин, по данным опыта (рис. 98),

$$\frac{V_л}{\pi D_{вент}} = f(u_2), \qquad (28)$$

где $u_2 = \pi D_{вент} n$.

Расход воздуха через активную часть

$$V_а = vS_к, \qquad (29)$$

где $S_к$ — суммарная площадь всех вентиляционных каналов;

$v$ — средняя скорость воздуха в радиальных каналах статора.

По данным опыта, для синхронных явнополюсных машин (см. рис. 65)

$$v = f\left(\frac{l}{\tau}\right).$$

Расчет на вентилирующее действие явнополюсного ротора.

Общий расход воздуха в машине

$$V = v_r \cdot S_r, \qquad (30)$$

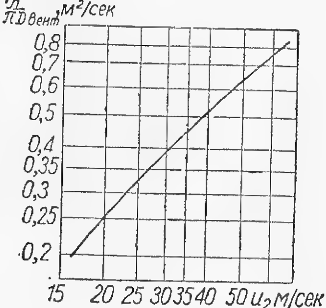


Рис. 98. Расход воздуха на одну сторону в функции скорости вентилятора.

где $S_r$ — сечение выхода воздуха из ротора (рис. 97) в радиальном направлении со скоростью $v_r$, причем

$$S_r = \pi D l \frac{c_p}{\tau}\ м^2; \qquad (31)$$

$$v_r = \sqrt{\frac{u_2^2 - u_1^2}{\xi}}, \qquad (32)$$

где $u_2$ и $u_1$ — окружные скорости ротора у полюсного наконечника и у основания полюса;

$\xi$ — опытный коэффициент аэродинамического сопротивления, равный по [98] приблизительно 5,7 (для нормальных явнополюсных машин открытой конструкции).

По данным наших опытов, для крупных машин защищенной конструкции с разомкнутой системой вентиляции $\xi \approx 11$; для замкнутой вентиляции $\xi \approx 20$.

По [102] расход воздуха, обеспечиваемый вентиляционным устройством, оценивают по формуле

$$V' = q_0 (n_s b_s + m)\,\frac{n\,[об/мин]}{100}\left(\frac{D}{100}\right)^2\ м^3/сек, \qquad (33)$$

где $n_s$ и $b_s$ — число и ширина радиальных вентиляционных каналов;

$m$ — коэффициент учета вентиляционного действия вылетов лобовых частей или двусторонняя ширина лопаток на роторе, *см*.

Для машин постоянного тока $q_0 = 31{,}5 \cdot 10^{-3}$; $m = 10$.
Для асинхронных машин $q_0 = 26 \cdot 10^{-3}$; $m = 10$.
Для явнополюсных синхронных машин:
$m$ — двусторонняя ширина лопаток;
$q_0 = 25 \cdot 10^{-3}$ при $l < 50$ *см*;
$q_0 = (25 \div 22) \cdot 10^{-3}$ при $50 < l < 100$ *см*;
$q_0 = (22 \div 18{,}7) \cdot 10^{-3}$ при $100 < l < 150$ *см*.
Полученную величину $V'$ сравнивают с потребным расходом по (63) гл. 6.

В случае значительного расхождения изменяют в требуемом направлении допустимый перегрев воздуха или ширину лопаток.

Для гидрогенераторов согласно [1]

$$V' = k_V \pi D n q_v \ м^3/сек, \tag{34}$$

где

$q_v = n_s (t_1 - b_п) Z_1 \cdot 10^{-4}$ $м^2$;
$Z_1$ — число пазов;
$k_V = 0{,}3 \div 0{,}5$.

Большая величина $k_V$ принимается при улучшенных аэродинамических качествах (срез клина в зоне радиальных каналов и пр.). Для ротора без радиальных каналов и с междуполюсными распорками $k_V = 0{,}25$.

Скорость омывания воздухом обмотки возбуждения составляет $(0{,}2 \div 0{,}25)\, u_2$.

Расчетный статический напор

$$H_0 = \eta_0 \frac{\gamma}{g} (u_2^2 - u_1^2), \tag{35}$$

где $u_2 \approx v_a$; $\eta_0 = 0{,}6$; $\frac{\gamma}{g} = 0{,}125$; $u_1 = \frac{\pi}{2}(D_0' + D_0'')\, n$, $D_0'$ и $D_0''$ — диаметры, на которых начинается захват воздуха спицами ротора для обеих сторон машины.

Внутреннее аэродинамическое сопротивление роторного колеса

$$Z_в = \frac{\Sigma \zeta_в}{(\pi D l)^2}, \tag{36}$$

где $\Sigma \zeta_в \approx 60$.

$$H = H_0 - Z_в V'^2. \tag{37}$$

Расход мощности на вентиляцию

$$p_{v1} = \frac{HV'}{102\eta} \ квт, \tag{38}$$

где $\eta$ — полный к. п. д. ($\eta \approx 0{,}15$).

Расчет центробежного вентилятора (рис. 99). По необходимому расходу и подсчитанному аэродинамическому сопротивлению определяем $H = Z_э V^2$ и $H_0 = \frac{H}{\eta_0}$.

Задаемся максимально возможным размером внешнего диаметра $D_2$.

$D_1$ определится величиной входного отверстия $f = (0{,}3 \div 0{,}4)\, F$, где $F$ — полуразность между внешним диаметром вентилятора $D_2$ и диаметром части ротора, подходящей к вентилятору.



Исходя из уравнений (17) и (18), определяем ширину вентилятора

$$b = \frac{V_{max}}{k u_2\, 0{,}92 \pi D_2} \approx \frac{2V}{k u_2\, 0{,}92 \pi D_2}. \tag{39}$$

Число лопаток вентилятора

$$n_л = \frac{\pi (D_2 + D_1)}{D_2 - D_1}. \tag{40}$$

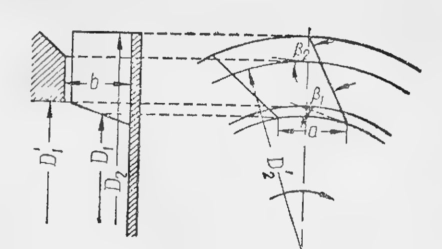


Рис. 99. К расчету напора центробежного вентилятора.

Для уменьшения шума выбирают для $n_л$ простые числа (11, 13, 19 и т. д.)

Вентилятор должен быть рассчитан на механическую прочность, особенно в быстроходных машинах [93].

Характеристика вентилятора $H = f(V)$ может быть построена по уравнению (23а) или приближенно по (19).

## 7-4. РАСЧЕТ ОСЕВОГО (ПРОПЕЛЛЕРНОГО) ВЕНТИЛЯТОРА

Осевые вентиляторы (рис. 100) устанавливаются в машинах с аксиальной или смешанной системой вентиляции. При вращении вентилятора в кожухе создается аксиальный поток воздуха. При свободных лопастях (без кожуха) у внешнего диаметра имеет место и радиальный поток воздуха. Потери напора в системе плюс динамический напор при выходе из вентилятора равны полному теоретическому напору, создаваемому вентилятором.

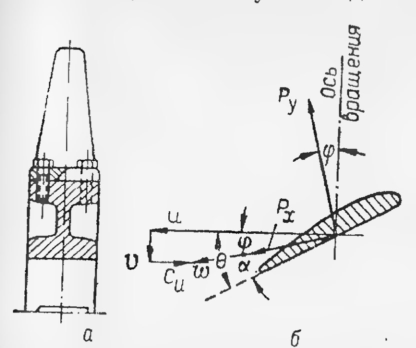



Рис. 100. Осевой вентилятор (*а*) и диаграмма скоростей потока в осевом вентиляторе (*б*).

Расчет величины напора и к. п. д. осевого вентилятора представляет более трудную задачу по сравнению с центробежным вентилятором и основывается на теории крыла самолета. В осевых вентиляторах различают следующие скорости (рис. 100, *б*):

1. Осевую скорость $v$, параллельную оси вращения, принимают равной расходу воздуха $V$, деленному на эффективное сечение $F$,

$$v = \frac{V}{F}, \tag{41}$$

где

$$F = 0{,}8 \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2); \tag{42}$$

$D_2$ и $D_1$ — диаметры по внешнему и внутреннему краю лопастей.

2. Окружную скорость на внутреннем диаметре $u_1 = \pi D_1 n$ и на наружном диаметре $u_2 = \pi D_2 n$.

3. Скорость закручивания струи $c_u$. Лопатки вентилятора при вращении закручивают воздух; перед входом в вентилятор $c_{uп} = 0$ у выхода $c_{uк} = c_{u\,\max}$. Среднее значение $c_u = 0{,}5 c_{u\,\max}$. По высоте лопатки величина $c_u$ является переменной

$$c_{ur} = c_{uR} \frac{R}{r}, \tag{43}$$

где $R$ — максимальный радиус элемента лопатки;

$r$ — переменный радиус, изменяющийся от $r_{\min} = \frac{D_1}{2}$ до $R = \frac{D_2}{2}$.

4. Относительная скорость $w$ — скорость потока по отношению к движущейся лопасти вентилятора

$$w = \sqrt{v^2 + (u - c_u)^2}. \tag{44}$$

Крыло устанавливается под углом установки $\theta$. Этот угол является переменным: у втулки, или у основания лопастей, он равен $\theta_1$, а у внешнего диаметра — $\theta_2$. Изменение угла по высоте лопатки осуществляют по закону

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \operatorname{tg} \theta_1 \frac{D_1}{D_2}. \tag{45}$$

Иногда угол $\theta$ делают постоянным.

По рис. 100, *б*

$$\theta = \varphi + \alpha, \tag{46}$$

где $\varphi$ — переменный угол по высоте лопасти и называется углом притекания:

$$\varphi = \arcsin \frac{v}{w}; \tag{47}$$

$\alpha$ — «угол атаки», величина которого берется в пределах 8—12°.

При вращении вентилятора возникают «подъемная сила» $p_y$ и «сила лобового сопротивления» $p_x$

$$\left.\begin{aligned} p_y &= \frac{\gamma}{g} C_y w^2 S \\ p_x &= \frac{\gamma}{g} C_x w^2 S \end{aligned}\right\}, \tag{48}$$

где $C_y$ и $C_x$ — опытные коэффициенты, зависящие от профиля крыла (рис. 101);

$\gamma$ — удельный вес газа;

$g$ — ускорение силы тяжести;

$S$ — поверхность крыла;

$w$ — относительная скорость.

Для профиля рис. 100 в пределах $0 < \alpha < 8°$

$$C_y \approx 0{,}0585\alpha, \quad C_x \approx 0{,}008 + 0{,}003\alpha$$

и в пределах $8° < \alpha < 12°$

$$C_y \approx 0{,}47 + 0{,}05(\alpha - 8°); \quad C_x \approx 0{,}032 + 7{,}5 \cdot 10^{-4} (\alpha - 8°)^2.$$



Отношение $p_y/p_x = C_y/C_x = k$ — называется «коэффициентом качества» крыла и берется обычно в пределах 10—15.

Полное давление на элемент поверхности лопастей в направлении движения по рис. 100 равно полному напору, создаваемому вентилятором, умноженному на поверхность $\pi D \Delta h$, где $\Delta h$ — элемент высоты лопатки, т. е.

$$p_y \cos\varphi - p_x \sin\varphi = \frac{\gamma}{g} w^2 \Delta S (C_y \cos\varphi - C_x \sin\varphi) = H_t \pi D \Delta h,$$

$$\Delta S = ib\Delta h,$$

где $i$ — число лопастей;

$b$ — ширина лопасти.

Отсюда, принимая во внимание (44), получаем напор

$$H_t = \frac{\gamma}{g} \frac{[v^2 + (u - c_u)^2]}{\pi D} ib (C_y \cos\varphi - C_x \sin\varphi). \tag{49}$$

Среднее его значение получится при подстановке средних значений

$$u_{ср} = \pi \left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right) n;$$

$c_u = c_{uср}$; $C_y = C_{yср}$; $C_x = C_{xср}$ при $\alpha = \alpha_{ср}$

$$\cos\varphi_{ср} = \frac{(u - c_u)_{ср}}{\sqrt{(u - c_u)^2 + v^2}} \tag{50}$$

и должно уравновесить сумму потерь напора и динамический напор при выходе $H_d$, т. е.

$$H_t = H + h_d + h_v = H + 0{,}062 v^2 + 0{,}05 c_u^2. \tag{51}$$

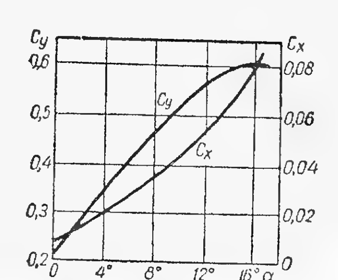



Рис. 101. Зависимость коэффициентов $C_x$, $C_y$ от угла атаки.

Другая формула для теоретического напора имеет вид

$$H_t = 2\rho c_u u, \tag{52}$$

где $\rho = \frac{\gamma}{g} = 0{,}125$ — для воздуха.

При свободных лопастях (без кожуха) осевой вентилятор создает статический напор, соответствующий формуле (22) для центробежного вентилятора. Полезная мощность вентилятора

$$P_п = H_t \pi D \Delta h v = (p_y \cos\varphi - p_x \sin\varphi) v.$$

Затрачиваемая мощность равна силе сопротивления в направлении $u$, умноженной на скорость $u$, т. е.

$$P = (p_x \cos\varphi + p_y \sin\varphi) u.$$

К. п. д. вентилятора

$$\eta_t = \frac{C_y \cos\varphi - C_x \sin\varphi}{C_x \cos\varphi + C_y \sin\varphi} \left(\frac{v}{u}\right). \tag{53}$$

Среднее значение $\eta_t$ получим, подставляя вместо $u$ и $\varphi$ их средние значения. Для учета потерь на трение вводят еще коэффициент 0,9, т. е. $\eta = 0{,}9\eta_t$. Величина $\eta_{t\max}$ в пределах 0,7 ÷ 0,8 получается при отвлеченном расходе $V = \frac{4V}{\pi D_2^2 u_2} = 0{,}15 - 0{,}25$. При отклонениях $V$ от указанных пределов к. п. д. резко падает.

Характеристики пропеллерного вентилятора $H = f(V)$ и $\eta = f(V)$ могут быть построены на основании следующих соображений. С ростом расхода и скорости $v$ скорость закручивания $c_u$ уменьшается, угол притекания $\varphi$ увеличивается, угол атаки $\alpha$ уменьшается (см. рис. 100). При нормальных условиях выбирают $c_u \approx (0,1 - 0,2)\,u$, $\alpha$ в пределах 8—12°. Приближенно величину $c_u$ можно определить или по (52), если из (51) определить потребный теоретический напор

$$c_u = \frac{H_t}{2\rho u_{cp}},$$

или по заданному статическому напору $H$

$$H = \eta_{пр} 2\rho c_u (u - c_u) = \eta_{пр} 2\rho w (u - w \cos\varphi) \cos\varphi, \tag{54}$$

где $\eta_{пр}$ — профильный к. п. д. $\approx 0,9$.

При $v = 0$ $c_u = u$. С ростом расхода $c_u$ уменьшается. Из (54) получим

$$2c_u = u - \sqrt{u^2 - \frac{2H}{\rho\eta_{пр}}}. \tag{55}$$

Можно также определить $c_u$, если задаться углом притекания $\varphi$, приняв его равным $\varphi = \theta_{cp} - \alpha \approx 25°$. При этом

$$c_u = u - w\cos\varphi = u - \frac{v}{\operatorname{tg}\varphi}. \tag{55a}$$

Характеристика статического напора $H$ в функции расхода $V$ или скорости $v$ может быть получена из (49), (51) и (54) при подстановке значений $c_u = f_1(v)$, $C_y = f_2(v)$, $\cos\varphi = f_3(v)$, $\sin\varphi = f_4(v)$, $C_x = f_5(v)$.

С ростом $v$ по (50) $\cos\varphi_{cp}$ уменьшается, $\sin\varphi_{cp}$ растет, $C_y$ уменьшается, так как уменьшается угол атаки $\alpha_{cp} = \theta_{cp} - \varphi_{cp}$. Ввиду этого $H = f(v)$ или $H = f(V)$ получается падающей (рис. 96). Это видно и из (54), поскольку $c_u$ с ростом $v$ падает. Для получения $H = f(V)$ из кривой $H_t(V)$ надо вычесть потери напора в вентиляторе

$$h_d + h_v \approx 0,06v^2 + 0,05\,c_u^2;$$

$$H = \frac{\gamma}{g} u c_u - 0,05c_u^2 - 0,06v^2 = f(V), \tag{56}$$

где

$$c_u = u - w\cos\varphi = u - \frac{v}{\operatorname{tg}\varphi}.$$

Характеристика воздухопровода

$$H = ZV^2. \tag{57}$$

Приравнивая (56) и (57), получим расход $V$ (рис. 96).

Расчет вентилятора теперь можно произвести в следующем порядке:

1) по известному из вентиляционного расчета суммарному напору $H$ и расходу $V$ определяем $v$ по (41) и $H + h_d$ по (51);

2) определяем угол $\varphi_{cp}$ по (50), $c_u$ по (55) и (55a) (желательно, чтобы $c_u \approx (0,1 - 0,2)\,u_{cp}$), выбираем угол атаки $\alpha$ в пределах 8—12°, получая $C_y \approx 0,47 - 0,57$ и средний угол установки лопастей $\theta_{cp} = \varphi_{cp} + \alpha$ (в некоторых конструкциях этот угол принимается постоянным);

3) при выборе средней ширины лопасти $b_{cp}$, числа лопастей $i$, средней скорости $u_{cp}$ можно принимать: а) высоту лопасти $h = \frac{D_2 - D_1}{2}$, б) отношение $\frac{h}{b}$ в пределах 1—2, в) отношение $\frac{ib_{cp}}{\pi D_1} \approx 1,1 - 1,2$. Диаметры $D_1$ и $D_2$ определяются допустимой окружной скоростью $u_2$, а также конструктивными условиями (размещение вентилятора на валу). При выбранной величине $h$ и отношении $\frac{h}{b_{cp}}$ получаем величину $b_{cp}$, а при выбранном отношении $\frac{ib_{cp}}{\pi D_1}$ находим число лопаток $i$. Желательно, чтобы шаг лопатки $t = \frac{\pi D_{cp}}{i}$ был больше ширины лопатки;

4) приравниваем $H + 0,062v^2 + 0,05c_u^2$ к величине $H_t$ по (49) и уточняем величины $\alpha$, $C_y$, $b_{cp}$ и $i$ так, чтобы равенство имело место (с точностью $\pm 10\%$).

Определяем ширину лопатки и углы установки на диаметрах $D_1$ и $D_2$

$$b_1 = b_{cp}\frac{D_{cp}}{D_1}; \quad \theta_1 = \alpha + \varphi_1; \quad \cos\varphi_1 = \frac{u_1 - c_u}{\sqrt{(u_1 - c_u)^2 + v_2}};$$

$$b_2 \approx b_{cp}\frac{D_{cp}}{D_2}; \quad \theta_2 = \alpha + \varphi_2; \quad \cos\varphi_2 = \frac{u_2 - c_u}{\sqrt{(u_2 - c_u)^2 + v^2}}.$$

Определяем к. п. д. вентилятора по (53) и строим характеристики $\eta = f(V)$ и $H = f(V)$.

Вентилятор должен быть рассчитан на механическую прочность, особенно в быстроходных машинах.

По Циганеку [141] статический напор осевого вентилятора

$$H = 0,122\frac{uc_u}{1 + p}, \tag{58}$$

где

$$p = 0,16\frac{t}{l_v}\left[0,8 + 1,7\left(\frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2}\right)^2\right].$$

Обычно $\theta_1 = \theta_2 = 10°,\ 20°,\ 30°,\ 45°$.

Расчетный диаметр и скорость

$$D_S = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{2}}; \quad u = \pi D_S n.$$

Шаг лопаток

$$t = \frac{\pi D_S}{i}.$$

Осевая ширина вентилятора

$$l_v = b_{ср} \sin\theta \; см.$$

Скорость закручивания и относительная скорость

$$c_u = u - w\cos\theta;$$

$$w \approx \frac{V}{F\sin\theta}; \quad F = hti.$$

Потеря напора

$$h_v = 0{,}05c_u^2.$$

Потеря напора на трение при проходе между лопатками согласно (3а)

$$h_т = \frac{37\,500 l_v V^2}{\sin\theta r^5 i^2} = k_т V^2, \qquad (59)$$

где

$$k_т = \frac{37\,500 l_v}{\sin\theta r^5 i^2},$$

$r$ — гидравлический радиус сечения для прохода воздуха между двумя лопатками, *см*:

$$r = \frac{ab}{a+b}; \quad a = t\sin\theta; \qquad b = \frac{D_2 - D_1}{2} = h.$$

Если известна характеристика воздухопровода

$$H = ZV^2 \qquad (60)$$

и характеристика вентилятора, то, приравнивая (60) выражению

$$H = H_c - h_v - k_т V^2, \qquad (61)$$

получим

$$V = \sqrt{\frac{H_c - h_v}{Z + k_т}}.$$

Расход мощности на вентиляцию

$$p_v = \frac{VH}{102\eta_м\eta_а} \; квт,$$

где $\eta_м$ и $\eta_а$ — механический и аэродинамический к.п.д., которые изменяются в зависимости от качества крыла и ряда других условий в пределах

$$\eta_м = 0{,}9 - 0{,}5; \quad \eta_а = 0{,}65 - 0{,}5.$$

Механический к.п.д. принимается в соображение для случаев независимых вентиляторов, приводимых во вращение особым двигателем.

## 7-5. ВОДОРОДНОЕ И ЖИДКОСТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Охлаждение водородом находит все более широкое применение. Выгоды охлаждения водородом сводятся к следующему [51]:

1. Ввиду значительного понижения плотности (при давлении $p = 1{,}05$ *ата* приблизительно в 10 раз с учетом наличия в составе водорода некоторого количества воздуха), соответственно уменьшаются потери на вентиляцию.



В таком же отношении будет иметь место и уменьшение потерь на трение, вызванное вращением ротора. Так как в крупных машинах потери на вентиляцию составляют до 40% всех потерь, то уменьшение их повышает к.п.д., или при том же к.п.д. дает возможность повысить мощность машины.

2. Теплоотдача поверхностей и теплопроводность материалов в атмосфере водорода несколько увеличиваются, что приводит к понижению нагрева.

3. Понижается эффект коронирования обмоток при высоких напряжениях.

4. Обеспечивается безопасность в пожарном отношении (водород не поддерживает горения).

5. Уменьшаются размеры газоохладителей и количество воды для охлаждения.

Расчет вентиляции водородом аналогичен расчету на воздух при подстановке плотности, соответствующей водороду при данном давлении.

Расход газа в $м^3/сек$ будет почти одинаковым

$$V = \frac{\Sigma p}{1{,}1\Delta\theta_a},$$

так как объемные теплоемкости водорода и воздуха почти равны. Таким образом, и скорости и расходы газа в $м^3/сек$ в системе будут иметь тот же порядок, что и при воздушном охлаждении. Так как циркулирует один и тот же объем газа (замкнутый цикл), то фактический расход водорода идет лишь на пополнение газа вследствие его утечки. Охлаждение водорода происходит аналогично воздушному охлаждению посредством охладителей с проточной водой.

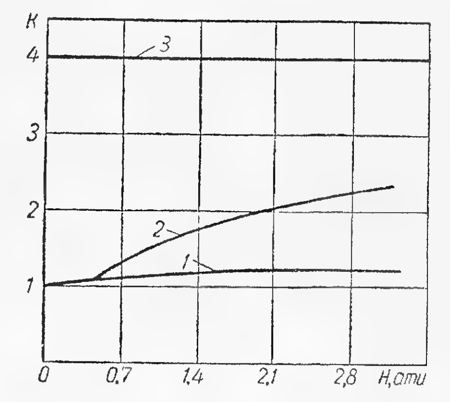



Рис. 102. Кратность роста мощности турбогенератора при разных способах охлаждения:

*К* — кратность роста мощности турбогенераторов; *Н* — избыточное давление водорода; *1* — обычное водородное охлаждение; *2* — непосредственное охлаждение обмоток водородом; *3* — непосредственное масляное охлаждение.

К недостаткам водородного охлаждения относятся: опасность взрыва в случае проникновения воздуха, необходимость контроля газа и применения соответствующей аппаратуры (удорожание обслуживания), более прочная станина с расчетом на взрыв гремучего газа и необходимость уплотнений.

Нормальное избыточное давление водорода составляет около 0,05 *ати*. При повышении давления интенсивность теплоотдачи увеличивается по закону, выраженному уравнением (51) гл.6. При повышении давления мощность данного габарита увеличивается в соответствии с кривой рис. 102. Недостатки повышенного давления водорода — трудность осуществления надежных уплотнений. В настоящее время производятся турбогенераторы с давлением водорода до 3 *ати*.

Стремление повысить мощность в единице турбогенератора и невозможность увеличения его габаритов приводит к необходимости интенсивных средств отвода тепла и повышения удельных нагрузок. При обычном охлаждении машины отвод тепла от обмоток затрудняется вследствие плохой теплопроводности высоковольтной изоляции. Это не дает возможности повысить плотность тока в обмотках. Продувание водорода внутри обмоток путем устройства полых проводников, меди специального профиля или специальных металлических трубок, уложенных в паз (рис. 259), дает возможность повысить плотность тока и мощность данного габарита в 2—3 раза. Это позволяет довести мощность в одной единице до 300 000 *квт* и выше. Еще более эффективным является жидкостное (водяное или масляное) охлаждение. Вода или масло могут прогоняться по трубкам внутри паза (непосредственное жидкостное охлаждение) или охладить железо якоря (косвенное охлаждение). Особенности расчета сверхмощных турбогенераторов и их охлаждения даны в гл. 12.

---

*Глава восьмая*

# МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

## 8-1. ЗАДАЧИ И ОБЪЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Необходимо различать три вида стоимости электрической машины (§ 2-1):

1) общезаводскую $M_m$, включающую главным образом стоимость активных материалов $M_а$, конструктивных материалов и покупных полуфабрикатов $M_к$ и стоимость производства $M_п$;

2) эксплуатационную, включающую расходы $M_э'$ при эксплуатации машины (стоимость потерь, ремонтов, обслуживания и т. п.), приведенную к стоимости материалов;

3) суммарную приведенную или «действительную» (общегосударственную), равную сумме общезаводской и эксплуатационной стоимостей

$$M_д = M_m + M_э'.$$

Целесообразность введения понятия действительной стоимости состоит в том, что уменьшение общезаводской стоимости при проектировании электрической машины, полученное за счет снижения веса активных материалов, как правило, приводит к увеличению потерь в машине и, следовательно, к увеличению эксплуатационной стоимости и, наоборот, снижение потерь и, следовательно, эксплуатационной стоимости приводит к увеличению общезаводской стоимости. Поэтому с общегосударственной точки зрения необходимо стремиться к тому, чтобы машина имела минимальную суммарную приведенную стоимость. Для этого при проектировании необходимо: а) выбрать наиболее правильное (экономическое) соотношение между расходом активных материалов и потерями, б) обеспечить хорошие эксплуатационные показатели (перегружаемость, устойчивость, пусковые качества и пр.), в) обеспечить минимальную стоимость конструктивных материалов и покупных полуфабрикатов, а также минимальные расходы при изготовлении и эксплуатации машины (простота обслуживания, надежность работы, минимальные расходы на ремонт и пр.).

Если первые две задачи относятся, главным образом, к электрическому и частично тепловому и вентиляционному расчетам, то задача о минимуме конструктивных материалов и минимуме расходов в производстве ложится в основном на конструирование и механические расчеты деталей машины.

Механические расчеты связаны с общей конструктивной разработкой машины и с проблемами технологии. Стоимость конструктивных материалов может быть уменьшена, например, путем применения сварных конструкций и более дешевых материалов, увеличения нагрузок на материал и уменьшения его веса.

Последнее требует от конструктора особого внимания. Уменьшение конструктивного веса за счет увеличения нагрузок не должно сопровождаться снижением надежности машины. Так, например, уменьшение сечения станины может привести к вибрациям, уменьшение веса ротора — к снижению его прочности и т. д.

Прогресс электромашиностроения в значительной степени связан с разрешением трех важных проблем: проблемы построения сверхмощных машин, проблемы построения сверхбыстроходных машин и проблемы снижения веса серийных машин массового производства. Успехи в этих областях зависят от развития металлургии, технологии, науки о прочности материалов и прочности конструкций.

При механическом расчете должна быть решена не только задача проверки машины на прочность, но и задача построения машины с минимальным конструктивным весом при сохранении ее эксплуатационной надежности и при минимальных затратах на ее изготовление. Как видно, эта задача связана с использованием достижений в ряде областей науки (металлургия, теория упругости и учение о прочности, теория колебаний, вопросы технологии, материаловедения, экономики и т. д.). За последнее время в отечественной и иностранной литературе появилось значительное количество работ, посвященных механическим расчетам и вопросу прочности электрических машин [1, 43, 68, 130, 136]. *

В этой книге рассмотрены только некоторые, наиболее важные, вопросы механического расчета.

Рассчитываются в основном следующие части машин:

1. *Валы*: а) на передаваемый крутящий момент, б) на изгибающий момент, в) на критические скорости, г) на крутильные колебания (в случае двух или трех машин, соединенных муфтами).

2. *Роторы* (в особенности быстроходных машин) на напряжения в теле, в зубцах, клиньях, бандажах, крепящих обмотку, в ласточкиных хвостах, которыми крепятся полюса к ободу, и т. д.

3. *Коллекторы* (в особенности быстроходных или крупных машин) на напряжения в пластинах, нажимных шайбах или бандажах и стягивающих болтах.

4. *Статоры*: а) на жесткость корпуса, б) на прочность фундаментных болтов, в) на прочность крепления полюсов и лобовых

* Особенно рекомендуется книга Б. Н. Красовского [68], методика которой в ряде случаев использована в данной книге.



частей обмотки, г) на прочность стяжных болтов железа статора и нажимного устройства.

Наиболее важными являются расчеты:

1) валов быстроходных машин на критические скорости;

2) валов на крутильные колебания;

3) распределения напряжений в роторах быстроходных машин;

4) напряжений в коллекторах быстроходных и крупных машин постоянного тока;

5) станин на жесткость и вибрацию;

6) подпятников вертикальных машин.

## 8-2. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

Понятие запаса прочности. При решении задачи о минимуме конструктивного веса в первую очередь возникает вопрос, какие нагрузки и в каких деталях (или узлах) можно считать допустимыми. Простые примеры показывают, что запас прочности нельзя определять только как отношение напряжения к пределу прочности. Необходимо учитывать допустимые деформации отдельных конструктивных узлов машины, предел усталости, температурные напряжения, местные напряжения и пластические деформации, влияние на прочность технологического процесса, формы детали и т. п.

Так, например, согласно [68] напряжения в проволочном бандаже значительно меньше предела прочности проволоки, но и эти напряжения нельзя повысить, так как могут произойти недопустимые деформации бандажа, расстройство балансировки, задевание лобовых частей за полюса и выход машины из строя. Массивные бандажи требуют при горячей посадке посадочного натяга, чтобы при угонной скорости бандаж вследствие деформации не освободился от своих посадочных поверхностей и не вызвал расстройства балансировки ротора.

В некоторых деталях могут появиться повышенные местные напряжения (концентрация напряжений) и пластические деформации. Допустимость этих деформаций зависит от характера нагрузки детали и степени ее ответственности. Согласно [68] местные пластические деформации иногда могут быть допущены при статических нагрузках (например на поверхности выточки в роторе турбогенератора). При динамических нагрузках необходимо исходить из предела усталости, определенного для соответствующего вида деформаций (изгиб, кручение, растяжение).

Характеристика материалов и критерии прочности: 1. Предел текучести (предел упругости) при растяжении $\sigma_s$, при изгибе $\sigma'_s$ и при кручении $\tau'_s$.2 . Предел прочности $\sigma_в$ (временное сопротивление на разрыв). 3. Предел усталости при растяжении $\sigma_w$, изгибе $\sigma'_w$ и кручении $\tau'_w$, то есть значение знакопеременного напряжения, при котором металл начинает разрушаться после $10 \cdot 10^6$ циклов для черных металлов и $100 \cdot 10^6$ циклов для цветных. В большинстве случаев это число циклов может быть достигнуто

через несколько недель работы машины. Поэтому знакопеременные напряжения должны быть не выше 60% от $\sigma_w$, $\sigma'_w$ или $\tau'_w$, в зависимости от характера нагрузок. 4. Относительное удлинение при разрыве $\delta_s$%. 5. Относительное сужение при разрыве $\psi$%. 6. Ударная проба $\alpha$ (*кгм/см*²) — удельная работа разрушения при ударе 7. Модули упругости $E$ и $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ (для стали $\mu = 0{,}27$, 0,3; $E = 2{,}1 - 2{,}2 \cdot 10^6$ *кг/см*²). 8. Твердость по Бринеллю $H_B$ — нагрузка на индикатор, вдавливаемый в испытуемый образец, отнесенная к площади отпечатка индикатора на поверхности образца.

При расчете деталей, сопряженных горячей посадкой, желательно значение пределов релаксации или ползучести брать при рабочих температурах 30—150°, имеющих место в электрических машинах.

В табл. 9 согласно [1, 68, 78] приведены механические характеристики некоторых марок стали.

*Таблица 9*

**Механические характеристики некоторых марок конструкционной стали**

| Марка стали | | Временное сопротивление $\delta_в$ (в *кг/мм*²) | Относительное удлинение $\delta_s$ (в проц.) | Предел текучести (в *кг/мм*²) при | | | Предел усталости (в *кг/мм*²) при | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ГОСТ 380—41 | ГОСТ 1050—41 | | | растяжении | изгибе | кручении | растяжении-сжатии | изгибе | кручении | срезе |
| | | | | $\sigma_s$ | $\sigma'_s$ | $\tau'_s$ | $\sigma_w$ | $\sigma'_w$ | $\tau'_w$ | $\tau_w$ |
| | | | | Углеродистые стали | | | | | | |
| Ст. 1 | Сталь 10 | 32—42 | 30 | 18 | 29,0 | 12,5 | 14,0 | 16 | 8,0 | 7,0 |
| Ст. 2 | » 15 | 35—45 | 27 | 20 | 32,0 | 13,5 | 14,5 | 17 | 8,5 | 7,5 |
| Ст. 3 | » 20 | 40—50 | 24 | 22 | 35,0 | 15,0 | 15,0 | 18 | 10,0 | 8,5 |
| Ст. 4 | » 25 | 43—55 | 22 | 24 | 38,0 | 16,5 | 16,0 | 19 | 11,0 | 9,0 |
| — | » 30 | 48—60 | 19 | 26 | 41,0 | 18,5 | 16,5 | 20 | 12,0 | 10,0 |
| Ст. 5 | » 35 | 52—65 | 18 | 28 | 43,5 | 19,5 | 17,5 | 21,5 | 13,0 | 11,0 |
| Ст. 6 | » 40 | 57—70 | 17 | 30 | 46,5 | 21,0 | 18,5 | 23 | 14,0 | 12,0 |
| — | » 45 | 60—75 | 15 | 32 | 49,5 | 22,5 | 21,5 | 25 | 16,0 | 14,0 |
| — | » 50 | 63—80 | 13 | 34 | 52,0 | 24,0 | 24,5 | 27 | 17,0 | 16,0 |
| | | | | Легированные стали | | | | | | |
| — | » 40Г | 58 | 29 | 33 | 45,0 | 24 | 25 | 28 | 22,5 | 20,5 |
| — | » 40Х | 73 | 25 | 34,5 | 48,0 | 24 | 22 | 23 | 17,0 | 16,0 |
| — | » 36ХИЧА | 96 | 26 | 51 | 70,0 | 38 | 34 | 35 | 28,0 | 27,0 |

Запас прочности роторов рассчитывается при угонной скорости $n_{уг} = 1{,}2 n_N$ для всех машин, кроме гидрогенераторов. В гидрогенераторах $n_{уг} \Leftarrow (1{,}8 \div 2)\, n_N$ и $n_{уг} = (2{,}3 - 3{,}5)\, n_N$. Так как такая скорость мало вероятна, то запас прочности гидрогенераторов, рассчитанный при $n_{уг}$ может быть принят меньшим, чем для прочих машин. Кроме того, для поворотно-лопастных турбин возможно избежать повышения скорости до величины $n_{уг}$ путем поворота лопастей.



В табл. 10 [68] даны максимальные механические напряжения $\sigma_{max}$ в роторах турбогенераторов при $n_{уг} = 1{,}2 \cdot 3000 = 3600$ об/мин.

*Таблица 10*

**Механические напряжения в роторах турбогенераторов** (в *кг/мм*²)

| Деталь | Характеристика | Тип | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Т2-6-2 | Т2-25-2 | Т-100-2 | ТВ-100-2 |
| Роторный бандаж | $\frac{\sigma_s}{\sigma_в}$ | $\frac{65{,}0}{80{,}0}$ | $\frac{70{,}0}{90{,}0}$ | $\frac{80{,}0}{100{,}0}$ | $\frac{80{,}0}{100{,}0}$ |
| | $\sigma_{max}$ | 27,7 | 44,7 | 48,6 | 50,58 |
| | $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_s}$ | 0,425 | 0,635 | 0,61 | 0,63 |
| Центрирующее кольцо | $\frac{\sigma_s}{\sigma_в}$ | $\frac{30{,}0}{60{,}0}$ | $\frac{30{,}0}{60{,}0}$ | $\frac{40{,}0}{60{,}0}$ | $\frac{40{,}0}{60{,}0}$ |
| | $\sigma_{max}$ | 12,8 | 18,3 | 21,7 | 19,8 |
| | $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_s}$ | 0,425 | 0,61 | 0,545 | 0,495 |
| Бочка ротора: | $\frac{\sigma_s}{\sigma_в}$ | $\frac{30{,}0}{50{,}0}$ | $\frac{42{,}0}{65{,}0}$ | $\frac{55{,}0}{70{,}0}$ | $\frac{55{,}0}{70{,}0}$ |
| центральное отверстие | $\sigma_{max}$ | 14,7 | 21,8 | 28,4 | 26,5 |
| основание зубца | $\sigma_{max}$ | 13,5 | 21,3 | 29,0 | 25,7 |
| шейка вала при номинальной мощности | $\sigma_{max}$ | 2,5 | 2,86 | 8,5 | 9,0 |
| шейка вала при внезапном коротком замыкании | $\tau_{max}$ | 6,0 | — | 5,8 | 5,8 |
| Вентилятор: | $\frac{\sigma_s}{\sigma_в}$ | $\frac{30{,}0}{60{,}0}$ | $\frac{45{,}0}{70{,}0}$ | — | $\frac{90{,}0}{105{,}0}$ |
| диск | $\sigma_{max}$ | 10,5 | 23,0 | — | 41,6 |
| внешнее кольцо | $\sigma_{max}$ | 15,2 | 22,4 | — | 51,8 |

Согласно [68] для статических нагрузок максимальное напряжение не должно превосходить 0,75 от предела текучести $\sigma_s$. Для динамических нагрузок максимально допустимые напряжения, определенные с учетом коэффициентов концентрации, а также масштабных и технологических факторов (см. ниже), не должны превышать 0,6 от предела усталости. При сложных напряжениях для определения запасов прочности по [1] строят график, подобный рис. 103, где по оси ординат отложен предел усталости, а по оси абсцисс — предел текучести.

Допустимые комбинированные напряжения должны лежать ниже прямой $\varphi_w\sigma_w - \varphi_s\sigma_s$, где $\varphi_w$ и $\varphi_s$ — коэффициенты загрузки (или величины, обратные запасу прочности). Как сказано выше, $\varphi_s = 0{,}75$; $\varphi_w = 0{,}6$.

На величину предела усталости оказывают влияние технологические факторы. Например, усталостная прочность вала с горячей посадкой втулки или вала с приваренными деталями значительно снижается.

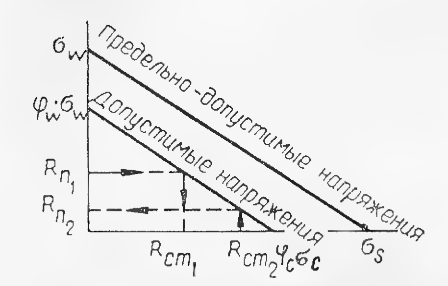



Рис. 103. Графики допустимых напряжений для комбинированной нагрузки.

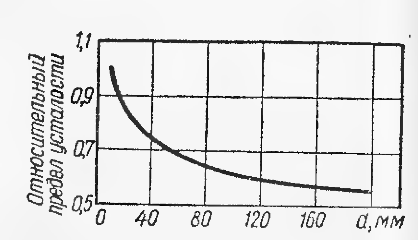



Рис. 104. Зависимость относительного предела усталости от диаметра образца.

В табл. 11 по [68] показано, насколько снижается предел усталости обжатого вала.

*Таблица 11*

**Снижение усталостной прочности вала в результате обжима насаженной деталью**

| Марка стали | $\sigma_в$ (в *кг/мм²*) | $\sigma'_w$ образца диаметром 10 *мм* (в *кг/мм²*) | $\sigma'_w$ образца диаметром 50 *мм* (в *кг/мм²*) | Эффективный коэффициент концентрации напряжений обжатого насаженной деталью вала диаметром: 50 *мм* | Эффективный коэффициент концентрации напряжений обжатого насаженной деталью вала диаметром: 100 *мм* и выше | $\sigma'_w$ обжатого насаженной деталью вала диаметром 100 *мм* и выше |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Сталь 20 | 40 | 18,0 | 12,6 | 2,20 | 3,45 | 5,20 |
| » 25 | 43 | 19,0 | 13,3 | 2,25 | 3,52 | 5,40 |
| » 30 | 48 | 20,0 | 14,0 | 2,35 | 3,70 | 5,40 |
| » 35 | 52 | 21,5 | 15,0 | 2,40 | 3,75 | 5,70 |
| » 40 | 57 | 23,0 | 16,0 | 2,60 | 4,07 | 5,70 |
| » 45 | 60 | 25,0 | 17,5 | 2,65 | 4,15 | 6,00 |
| » 50 | 63 | 27,0 | 19,0 | 2,70 | 4,25 | 6,35 |

Электросварка сильно снижает предел усталости. По [68] приварка ребер к валу снижает предел усталости от 17 *кг/мм²* без приварки до 3 *кг/мм²* с приваркой.

Кроме технологических факторов, на предел усталости влияют масштабные факторы, то есть величина изделия. На рис. 104 и в табл. 11 показана зависимость предела усталости от диаметра образца.



## Основные свойства некоторых материалов

1. Медь электролитическая (Cu — 99,93%): $\rho_{20} = 0{,}01784$ *ом·мм²/м*, (1,784 · $10^{-6}$ *ом · см*); $\rho_\theta = \rho_{20} \cdot \frac{235 + \theta}{235 + 20}$; $\sigma_в = 22$—24 *кг/мм²*; $\delta_s = 40$—35% при $d = 4$ *мм*; $\delta_s = 10\%$ при $d = 0{,}05 \div 0{,}1$ *мм*; $E = 5000$—12 000 *кг/см²* (в среднем $E = 8500$ *кг/см²*); средний коэффициент линейного расширения 1,7 · $10^{-5}$ *1/град*.

Предел прочности меди $\sigma_в$ сильно зависит от температуры. По [70]

| θ° C | 20 | 100 | 200 | 300 | 450 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_в$, *кг/мм²* (мягкая медь) | 23 | 21,5 | 18,5 | 15,5 | 10,0 |
| $\sigma_в$, *кг/мм²* (твердая медь) | 46 | 42,5 | 21 | 15,5 | 10 |

2. Бронзы: прокатная бронза (фосфористая или оловянистая): $\sigma_в = 30 \div 32$ *кг/мм²*;

$$\rho = 0{,}14 - 0{,}16 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м};$$

литейная бронза для вкладышей подшипников с большим сопротивлением износу (Cu — 80%, Sn — 20%): $\sigma_в = 23$ *кг/мм²*.

3. Латунь (Cu — 60—68%): $E = 8000 \div 10\,000$ *кг/см²*; коэффициент линейного расширения 2,1 · $10^{-5}$ *1/град*; $\rho = 0{,}07$ *ом · мм²/м*.

4. Алюминий: $E$=5700—8400 *кг/см²*; температура плавления 658°C; коэффициент линейного расширения 2,31 · $10^{-5}$ *1/град*; теплоемкость при 0° — 0,209 *ккал/кг · град*; теплоемкость при 1000° — 0,223; теплопроводность: при 0° — 0,502 *вт/см² · град*; при 100° — 0,490; при 300° — 0,450; увеличение объема при расплавлении 6%; удельное сопротивление (Al — 90,6%): при 0° — 0,0263; при 20° — 0,0288; при 100° — 0,0375 *ом · мм²/м*.

5. Силумин: $\sigma_в = 17$—20 *кг/мм²*; $\delta = 4$—8%.

6. Сплав 708 (Cu — 98,5%; Sn — 1,7%): $\rho = 0{,}0385$ *ом · мм²/м*; $\sigma_в = 20$ *кг/мм²*; температура плавления 1060° С.

7. Сплав 707 (Cu — 97,5%; Sn — 1,75%; Si — 0,75%): $\rho = 0{,}105$ *ом · мм²/м*; $\sigma_s = 45$ *кг/мм²*; температура плавления 1060° С.

8. В таблицах приведены данные электротехнической стали (приложение II), углеродистой кованой стали (табл. 12), стали для валов (табл. 13), стального литья (табл. 14), специальных сталей (табл. 15), проволоки для бандажей (табл. 16).

Горячие посадки. Определение «натяга», т. е. разницы внутреннего диаметра насаживаемой детали и наружного диаметра посадочной поверхности зависит от вида нагрузки. При нагрузке центробежными силами величина натяга определяется условием разъединения сопряженных деталей при угонной скорости; при нагрузке тангенциальными силами — величиной давления, противостоящего смещению детали от тангенциального усилия.

При расчете горячих посадок необходимо: определить посадочные напряжения в кольце и втулке с учетом явления релаксации (ослабление начальной плотности посадки), то же с учетом снижения

*Таблица 12*

**Механические свойства кованой углеродистой стали**

| Содержание углерода (в проц.) | Нормальные свойства | | | | | Улучшение свойства | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | отожженного образца | | холоднотянутого образца | |
| | $\sigma_B$ (в $кг/мм^2$) | $\sigma_s$ (в $кг/мм^2$) | $\delta$ (в проц.) | $\psi$ (в проц.) | $H_B$ (в $кг/мм^2$) | $\sigma_B$ (в $кг/мм^2$) | $\delta$ (в проц.) | $\sigma_B$ (в $кг/мм^2$) | $\delta$ (в проц.) |
| Менее 0,1 | 30—40 | 25—20 | 30 | 70—60 | 84—110 | 30—35 | 35—30 | 80—100 | 5—4 |
| 0,1 | 34—42 | 22—27 | 30 | 70—60 | 94—116 | 30—35 | 35—30 | 80—100 | 5—4 |
| 0,1—0,25 | 37—45 | 24—28 | 25 | 65—55 | 102—126 | 35—37 | 30—25 | 90—110 | 5—4 |
| 0,25 | 42—50 | 25—30 | 24 | 60—50 | 115—140 | 42—44 | 28—25 | 120—130 | 4—2 |
| 0,35 | 50—60 | 30—40 | 22 | 55—45 | 138—165 | 50—55 | 22—20 | 140—160 | 4—2 |
| 0,45 | 60—70 | 30—45 | 17 | 45—35 | 166—205 | 60—65 | 20—17 | 160—180 | 4—2 |
| 0,60 | 70—85 | 40—50 | 12 | 40—30 | 205—250 | 70—75 | 14—12 | 180—190 | 4—2 |

*Таблица 13*

**Механические свойства валовой стали**

| Характеристика материала | Валы гидрогенераторов | Валы электровозных двигателей | Валы прокатных двигателей | Сталь для роторов турбогенераторов ($2p = 2$) при мощности | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | до 5000 *ква* | 3000—15 000 *ква* | 15 000—45 000 *ква* |
| $\sigma_B$ (в $кг/мм^2$) | 48—55 | 70—74 | 55—60 | 55—60 | 60—65 | 65—70 |
| $\sigma_s$ (в $кг/мм^2$) | 24—26 | 45—46 | 28—30 | 30—35 | 38—42 | 45—50 |
| $\delta$ (в проц.) | 20—19 | 22—20 | 16 | 24—20 | 20—18 | 18—17 |
| $\psi$ (в проц.) | 30—32 | — | — | 40 | 28 | 40 |
| $\alpha$ (в $кг/см^2$) | — | 6 | 4 | 5 | 7 | 7 |

усталостной прочности обжатых деталей, оценить величину коэффициента трения по поверхности сопряжения деталей. Скорость вращения, при которой внутренний диаметр кольца, растянутого центробежными силами, будет равен наружному диаметру вала, называется разъединительной скоростью $n_0$. При этом должно быть

$$n_0 \geqslant n_{уг}.$$

При расчете посадок, подверженных тангенциальным усилиям, необходимо создать минимальное удельное давление, обеспечивающее передаваемый вращающий момент, во избежание снижения усталостной прочности конструкции. Из двух сопряженных горячей посадкой деталей более напряженной является охватывающая деталь, так как у внутренней кромки существуют растягивающие тангенциальные напряжения $\sigma_{кt}$ и сжимающие радиальные $\sigma_{кr}$. Максимальные скалывающие напряжения $\tau_{max}$ для кольца

$$\tau_{к\,max} = \frac{1}{2}[\sigma_{кt} - (-\sigma_{кr})] = \frac{1}{2}(\sigma_{кt} + \sigma_{кr}); \qquad (1)$$



*Таблица 14*

**Механические и магнитные характеристики стального литья**

| Характеристика материала | Сорт стали | | |
|---|---|---|---|
| | Мягкая магнитная | английская никелевая сталь | обычное стальное литье |
| $\sigma_B$ (в $кг/мм^2$) | 38—42 | 60 | 46—48 |
| $\sigma_s$ (в $кг/мм^2$) | 19—20 | 40 | 22—24 |
| $\delta$ (в проц.) при $\frac{r}{d} = 4$ | 20—22 | 25 | 18—20 |
| Химический состав | C — 0,25%<br>Mn — 0,7%<br>Si — 0,3%<br>—<br>P < 0,06%<br>S < 0,05% | C — 0,33%<br>Mn — 0,56%<br>Si — 0,23%<br>Ni — 4,2%<br>P < 0,03%<br>S < 0,2% | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— |
| Ампер-витки на сантиметр при $B = 15\,000$ *гс* | 18 | 20 | 30 |
| » $B = 17\,000$ » | 50 | 63 | 85 |
| » $B = 19\,000$ » | 120 | — | 200 |

*Таблица 15*

**Состав и свойства специальных сталей для кованых бандажей**

| Сталь | Химический состав | Магнитные свойства | Механические свойства | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\sigma_B$ (в $кг/мм^2$) | $\sigma_s$ (в $кг/мм^2$) | $\delta$ (в проц.) | $\psi$ (в проц.) |
| Хромоникелевая | C — 0,4 — 0,5%<br>Cr — 1%; Ni — 3%<br>Mn — 0,5% | Магнитная | 90 | 70 | 10 | 50 |
| Марганцевая | C — 0,35 — 0,40%<br>Mn — 0,8 — 1,0%<br>Si — 0,30 —0,35% | Магнитная | 57—80 | 48—50 | 18—16 | 50—48 |
| Никелевая | C—0,3%; Mn—0,6%<br>Si—0,4%; Ni—25% | Немагнитная | 65—70 | 35—37 | 45—40 | 50—40 |
| Хромоникелемарганцевая | C—0,7%; Si—0,45%<br>Mn — 9%; Cr — 3%<br>Ni — 8% | Немагнитная | 90—100 | 70—80 | 25 | — |

для втулки

$$\tau_{v\,max} = \frac{1}{2}[-\sigma_{vt} - (-\sigma_{vr})] = \frac{1}{2}(\sigma_{vr} - \sigma_{vt}). \qquad (2)$$

Следовательно, достаточно сопоставить с пределом текучести при кручении $\tau_s'$ величину $\tau_{к\,max}$.

16*

## 8-3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТЫ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦЕ И ТОЛСТОСТЕННОМ ЦИЛИНДРЕ ПО [68]

1. Расчет кругового кольца, нагруженного системой сосредоточенных радиальных сил (рис. 105).

Растягивающее усилие $C_р$ и напряжение $\sigma_р$ в поперечном сечении кольца от суммы сил $\sum p = 2pP$ (сила $P$ может быть, например, центробежной силой полюса, а кольцом — обод, к которому прикреплены $2p$ полюса)

$$C_р = \frac{2pP}{k_р 2\pi}; \quad \sigma \approx \sigma_р = \frac{C_р}{S_0}, \tag{3}$$

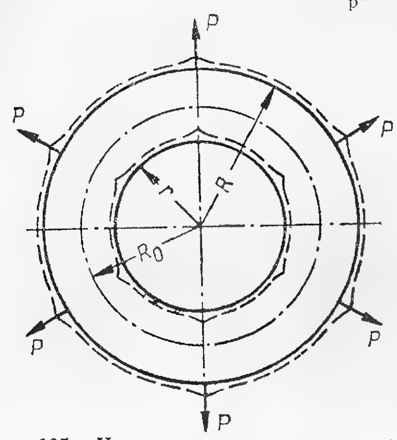



Рис. 105. Кольцо, нагруженное системой сосредоточенных радиальных сил.

где $S_0$ — сечение кольца;

$$k_р = \frac{\sin \alpha'}{\alpha'}; \quad \alpha' = \frac{\pi}{2p}.$$

Напряжение $\sigma_м$ в поперечном сечении кольца от изгибающего момента

$$\sigma_м = \frac{M_{изг}}{I} h, \tag{4}$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент в точке приложения силы:

$$M_{изг} = P\frac{R_0}{2}\left(\operatorname{ctg}\alpha' - \frac{1}{\alpha'}\right);$$

$h$ — расстояние от наружной кромки поперечного сечения кольца от центра тяжести сечения;

$I$ — момент инерции поперечного сечения кольца относительно нейтральной оси сечения;

$R_0$ — средний радиус кольца (рис. 105).

Максимальное напряжение от суммы $\sigma_р$ и $\sigma_м$

$$\sigma_{max} = \sigma_р + \sigma_м. \tag{5}$$

Растягивающее усилие и напряжение от центробежных сил собственного веса в случае вращения кольца

$$C_\omega = \frac{\Sigma P_\omega}{2\pi}; \quad \sigma_\omega = \frac{C_\omega}{S_0}, \tag{6}$$

где $\Sigma P_\omega$ — общая центробежная сила кольца

$$\Sigma P_\omega = \frac{G_0}{981}\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 n_{max}^2 R_i \ кг, \tag{7}$$

$R_i$ — радиус инерции кольца

$$R_i = R_0\sqrt{\frac{2}{1+\alpha}} \ см;$$

$$R_0 = \frac{r+R}{2}; \quad \alpha = \frac{r}{R};$$

$G_0$ — вес кольца, $кг$; $n_{max}$ — максимальная скорость, об/мин.



Суммарное растягивающее напряжение

$$\sigma = \sigma_р + \sigma_м + \sigma_\omega. \tag{8}$$

Здесь не учитывается коэффициент концентрации напряжений, так как нагрузка предполагается не знакопеременная. Полученная величина $\sigma$ должна быть сопоставлена с пределом текучести $\sigma_s$. При этом согласно сказанному выше должно быть

$$\sigma < (0{,}75 - 0{,}8)\,\sigma_s.$$

2. Расчет кругового кольца, нагруженного парами сил, лежащими в плоскостях его поперечных сечений, рис. 106. К этому случаю относятся:

а) расчет нажимных колец шихтованных магнитопроводов статора и ротора;

б) расчет нажимных шайб в коллекторах и т. п.

Величина ломающего момента в сечении кольца [68]

$$M_л = \frac{\Sigma M}{2\pi}, \tag{9}$$

где $\sum M$ — сумма всех выкручивающих кольцо моментов:

$$\sum M = \sum Pa,$$

где $\sum P$ — сумма сил; $a$ — плечо.

Момент инерции поперечного сечения кольца относительно оси $y$

$$I_y = \frac{hb^3}{12}, \tag{10}$$

где $h$ и $b$ по рис. 106.

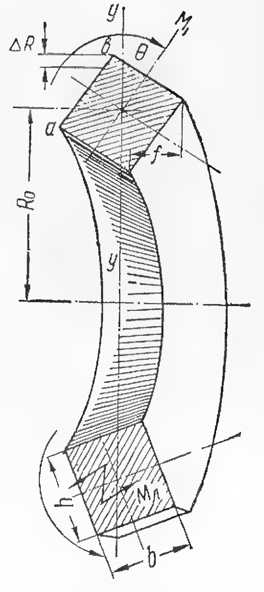



Рис. 106. Деформация кольца, нагруженного выкручивающим моментом.

Максимальное растягивающее напряжение

$$\sigma_{max} = \frac{M_л}{I_y} x_m, \tag{11}$$

где $x_m$ — расстояние наиболее удаленной точки поперечного сечения кольца от оси $y$.

Для прямоугольного кольца шириной $b$

$$x_m = \frac{b}{2}.$$

Для фигурного сечения берется расстояние от нейтральной оси.

Угол поворота сечения кольца

$$\theta = \frac{M_л R_0}{EI_y}. \tag{12}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_л}{I_y} \cdot x_{m1}, \qquad (13)$$

где $x_{m1}$ — наибольшее расстояние от нейтральной оси до внешнего края.

Прогиб кольца

$$y = \theta h = \frac{M_л R_0}{EI_y}(R - r), \qquad (14)$$

где $\theta$ — угол поворота сечения;
$h$ — радиальная высота кольца (рис. 106).

Так как $R_0 = \frac{1}{2}(R + r)$, то обозначая $\alpha = \frac{r}{R}$, получим

$$y = \frac{M_л R^2}{2EI_y}(1 - \alpha^2). \qquad (15)$$

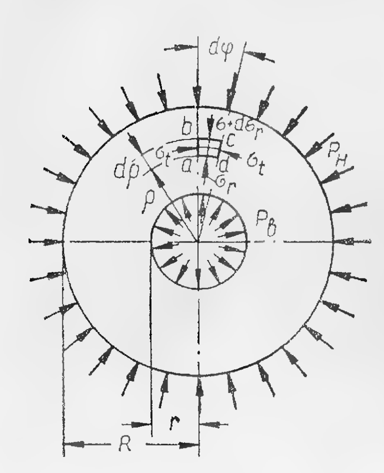



Рис. 107. Толстостенный цилиндр, нагруженный наружным и внутренним равномерно распределенным давлением.

3. Расчет напряжений в толстостенном цилиндре. К этой задаче приводится расчет горячих посадок соединительных муфт, роторных бандажей и пр.

В случае, когда центробежные силы от собственного веса цилиндра отсутствуют, но имеется равномерно распределенная нагрузка по наружной поверхности $p_н$ и по внутренней $p_в$, решение дает закон распределения напряжений [127, 12, 68].

Тангенциальное напряжение на расстоянии $\rho$ от центра (рис. 107)

$$\sigma_t = \frac{\alpha^2 p_в - p_н}{1 - \alpha^2} + \frac{(p_в - p_н)\,\alpha^2}{\left(\frac{\rho}{R}\right)^2 (1 - \alpha^2)}. \qquad (16)$$

Радиальное напряжение

$$\sigma_r = \frac{\alpha^2 p_в - p_н}{1 - \alpha^2} - \frac{(p_в - p_н)\,\alpha^2}{\left(\frac{\rho}{R}\right)^2 (1 - \alpha^2)}. \qquad (17)$$

Знаки усилий $p_н$ и $p_в$ в уравнениях соответствуют направлениям, показанным на рис. 107. Так как $\sigma_t > \sigma_r$, то расчет прочности должен быть по $\sigma_t$. Максимум $\sigma_t$ будет при $\rho = r$, то есть при $\frac{\rho}{R} = \alpha$

$$\sigma_{t\,max} = \frac{\alpha^2 p_в - p_н}{1 - \alpha^2} + \frac{p_в - p_н}{1 - \alpha^2} = p_в \frac{1 + \alpha^2}{1 - \alpha^2} - \frac{2p_н}{1 - \alpha^2}. \qquad (18)$$



В случае, когда учитываются центробежные силы собственного веса цилиндра, необходимо прибавить тангенциальные напряжения в цилиндре на расстоянии $\rho$ от центра

$$\sigma_{\omega t} = \sigma_i \frac{3 + \mu}{8}\left[1 + \alpha^2 - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu}\left(\frac{\rho}{R}\right)^2 + \alpha^2\left(\frac{R}{\rho}\right)^2\right]. \qquad (19)$$

Максимум будет при $\rho = r$ или при $\frac{\rho}{R} = \alpha$ ($\mu = 0{,}3$)

$$\sigma_{\omega t\,max} = \sigma_i 0{,}825\,(1 + 0{,}212\alpha^2), \qquad (20)$$

где $\sigma_i$ — тангенциальное напряжение во вращающемся кольце радиуса $R$ толщиной $dR$ от собственного веса

$$\sigma_i = \gamma \frac{2\pi R\, dR}{g \cdot 2\pi\, dR}\omega^2 R = \frac{\gamma v_i^2}{g}. \qquad (21)$$

Здесь $g = 981$ *см/сек*²; $v_i$ — окружная скорость на наружной поверхности цилиндра:

$$v_i = \omega R\, \frac{см}{сек};$$

$\gamma$ — удельный вес материала, $\frac{кг}{см^3}$.

Тангенциальные напряжения от равномерной нагрузки — $p_н$ на наружной поверхности вращающегося цилиндра согласно (16)

$$\sigma_t = \frac{p_н}{1 - \alpha^2}\left(1 + \frac{\alpha^2}{\rho^2}R^2\right). \qquad (22)$$

Максимум будет при $\frac{\rho}{R} = \alpha$

$$\sigma_{t\,max} = \frac{2p_н}{1 - \alpha^2}. \qquad (23)$$

Суммарные тангенциальные напряжения на внутренней поверхности цилиндра

$$\sigma_{max} = \sigma_{t\,max} + \sigma_{\omega t\,max} = \frac{2p_н}{1 - \alpha^2} + \sigma_i 0{,}825\,(1 + 0{,}212\alpha^2). \qquad (24)$$

Для случая только внутреннего давления приращение внутреннего радиуса по [68]

$$\Delta r_в = \frac{p_в r}{E}\left[\frac{1 + \alpha^2}{1 - \alpha^2} + \mu\right] \qquad (25)$$

(для стали $\mu \approx 0{,}3$), приращение наружного радиуса

$$\Delta R_н = \frac{2p_н R\alpha^2}{E\,(1 - \alpha^2)}. \qquad (26)$$

Для случая только наружного давления

$$\Delta r_в = -\frac{2p_н r}{E\,(1 - \alpha^2)}; \qquad (27)$$

$$\Delta R_н = -\frac{p_н R}{E}\left[\frac{1 + \alpha^2}{1 - \alpha^2} - \mu\right]. \qquad (28)$$

Для сплошного цилиндра $\alpha = 0$.

Приведенные формулы служат для расчета горячих посадок. Прочность цилиндра, насаженного на другой цилиндр или вал, определяется величиной максимальных скалывающих напряжений на внутренней кромке насаженного цилиндра. Известно, что при растяжении элемента по двум взаимно перпендикулярным направлениям

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}. \quad (29)$$

В данном случае $\sigma_x = \sigma_t$ — растягивающее напряжение и $\sigma_y = -\sigma_r$ — сжимающее, поэтому

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_t - (-\sigma_r)}{2} = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2}. \quad (30)$$

На внутренней кромке

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_t + p_в}{2}. \quad (31)$$

4. Податливости и коэффициенты деформации основных конструктивных элементов. *Податливостью* называется деформация детали на единицу приложенного усилия (обычно в *см/т* или в *см/кг*).

Для круглого толстостенного цилиндра, нагруженного равномерно суммарным радиальным наружным давлением $\Sigma Q_1$ (*кг/см* на 1 *см* длины) изменение наружного диаметра $\Delta D$ согласно (28)

$$\Delta D = 2\Delta R_н = \frac{2\Sigma Q_1 R_н}{2\pi RbE}\left(\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} - 0{,}3\right) = \Sigma Q_1 \lambda_1'. \quad (32)$$

Отсюда податливость по наружному диаметру (в *см/кг*)

$$\lambda_1' = \frac{0{,}32}{bE}\left(\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} - 0{,}3\right), \quad (33)$$

где $\alpha = \frac{r_{в1}}{R_{н1}} = \frac{\text{внутренний радиус}}{\text{наружный радиус}}$.

Аналогично по (27) приращение внутреннего диаметра

$$\Delta d = 2\Delta r_в = 2\frac{2\Sigma Q_1 r}{2\pi RbE(1-\sigma)} = \Sigma Q_1 \lambda_1'', \quad (34)$$

отсюда податливость по внутреннему диаметру

$$\lambda_1'' = \frac{0{,}64}{bE}\,\frac{\alpha}{1-\alpha^2}. \quad (35)$$

Под действием внутреннего давления $\Sigma Q_2$ приращение внутреннего диаметра по [25]

$$\Delta d = 2\Delta r_в = \Sigma Q_2 \lambda_2'' \quad (36)$$

и податливость (в *см/кг*)

$$\lambda_2'' = \frac{0{,}32}{bE}\left[\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} + 0{,}3\right]. \quad (37)$$

Приращение наружного диаметра по (26)

$$\Delta D = 2\Delta R_н = Q_2 \lambda_2' \quad (38)$$

и податливость

$$\lambda_2' = \frac{0{,}64}{bE}\,\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2}\ см/кг. \quad (39)$$



Податливость $m$ болтов сечением каждый по $F$ *см*², работающих на сдвиг и изгиб (рис. 108),

$$\lambda_\tau = \frac{s}{FEm}\left[1{,}3 + 0{,}67\left(\frac{s}{d}\right)^2\right]. \quad (40)$$

Податливость фланца, нагруженного радиальными силами $Q$, например, от спиц ротора через болты или заклепки (рис. 109)

$$\lambda_ф = \frac{\lambda_a'' \cdot \lambda_{b\sigma}'}{\lambda_a'' + \lambda_{b\sigma}'}, \quad (41)$$

где $\lambda_a'' = \frac{0{,}32}{bE}\left(\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} + 0{,}3\right)$ — податливость кольца при $\alpha = \frac{R_в}{R}$;

$\lambda_{b\sigma}' = \lambda_1' = \frac{0{,}225}{bE}$ — податливость вала.

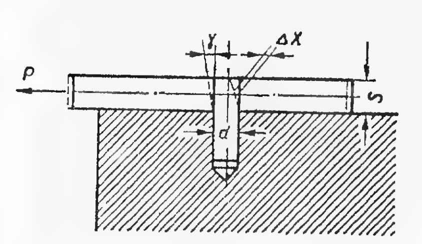



Рис. 108. К расчету податливости болта, работающего на сдвиг.

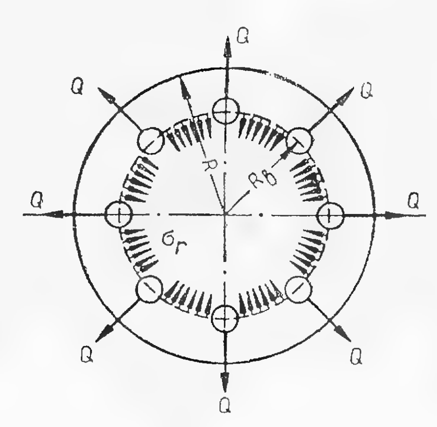



Рис. 109. Усилия, действующие на фланце роторного вала.

*Коэффициенты деформации* для вращающихся деталей по [68] представляют собой величины деформации данной детали в сантиметрах при 1000 об/мин.

Деформация вращающегося цилиндра

$$\Delta D = D\frac{\sigma}{E} = K\left(\frac{n}{1000}\right)^2, \quad (42)$$

отсюда

$$K = \frac{\sigma}{E}\cdot D\left(\frac{1000}{n}\right)^2. \quad (43)$$

Коэффициент деформации будет различным для различных точек детали. Так, для вращающихся цилиндров он будет различным на наружной и внутренней кромке цилиндра.

Из уравнений (20) и (43) получаем:

для внутреннего диаметра, подставляя $\sigma = \sigma_t$ из (20),

$$K'' = 3{,}8\frac{D^3}{E}(4{,}7 + \alpha^2)\alpha \cdot 10^{-3}; \quad (44)$$

для наружного диаметра

$$K' = 3{,}8\frac{D^3}{E}(1 + 4{,}7\alpha^2)\cdot 10^{-3}; \quad (45)$$

для внутреннего диаметра с учетом центробежных сил масс, расположенных на периферии,

$$K''_{\text{рез}} = \frac{3{,}8\alpha}{E}\left[D^3(4{,}7+\alpha^2) + 1880\frac{G_0}{b}\frac{R_0}{1-\alpha^2}\right]\cdot 10^{-3}, \tag{46}$$

где $G_0$ — вес деталей, расположенных на периферии, *кг*;
$R_0$ — радиус по центру тяжести этих деталей, *см*;
$b$ — длина цилиндра, *см*.

## 8-4. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ РОТОРОВ

1. Проволочные бандажи. Напряжение в бандаже равно сумме напряжений центробежных сил собственного веса $\sigma_i = \frac{\gamma v^2}{g}$ и веса обмотки $G$, удерживаемой бандажом, а также напряжения от начального натяга $\sigma_z$

$$\sigma = \frac{\gamma v^2}{g} + \frac{11{,}2GR_m\left(\frac{n}{1000}\right)^2}{2\pi w\frac{\pi}{4}\ d^2 10^{-2}} + \sigma_z\ \text{кг/см}^2, \tag{47}$$

где $R_m$ — радиус по центру тяжести лобовых частей, *см*;
$w$ — число витков бандажа;
$d$ — диаметр проволоки, *мм*;

Из (47) получаем необходимое число витков, принимая $\sigma = (0{,}7 - 0{,}8)\,\sigma_z$ (табл. 16)

$$w = \frac{225GR_m\left(\frac{n}{1000}\right)^2}{(0{,}75\sigma_s - \sigma_i - \sigma_z)\,d^2}. \tag{48}$$

*Таблица 16*

**Характеристика бандажной проволоки**

| Материал | Стальная проволока | | | Бронзовая проволока |
|---|---|---|---|---|
| | твердая | мягкая | немагнитная | |
| Диаметр в (*мм*) | 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; | 2,0; 2,5; | 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; | 0,8; 1,0; 1,2; |
| Предел прочности | 180—170 | 120 | 155—165 | 90—95 |
| Предел упругости | 155—145 | 100 | 140—150 | 80—85 |
| Допускаемое растягивающее напряжение $\sigma_z$ при намотке (в *кг/мм²*) | 60—65 | 45 | 55 | 32 |

Величина $G$ при наличии клиньев якоря принимается равной весу лобовых частей обмотки. При креплении обмотки посредством одних бандажей, без клиньев, величина $G$ равна весу всей обмотки якоря.

Как было указано, проволочные бандажи должны рассчитываться не по допускаемым напряжениям, а по допускаемым деформациям.



Поэтому результирующее напряжение по (47) в отдельных случаях может быть допущено значительно ниже чем $0{,}75\sigma_s$.

Для бандажей на активной длине якоря ширина бандажной ленты на одну канавку $l_б$ должна быть также проверена на допустимые потери с единицы поверхности бандажа [44]

$$w = \frac{p^2 d}{\pi}\left(\frac{n}{1000}\right)^2 B_\delta^2 l_б^2\ \text{вт/см}^2,$$

где $w \leqslant 0{,}55 \div 0{,}65\ \frac{\text{вт}}{\text{см}^2}$;
$p$ — число пар полюсов;
$d$ — диаметр бандажной проволоки, *см*;
$n$ — скорость, об/мин;
$B_\delta$ — индукция, *вб/м²*;

Обычно $l_б$ не должна превышать 1,5—2 *см*.

2. Расчет горячей посадки по заданной разъединительной скорости. Согласно (42) приращение внутреннего диаметра кольца (рис. 110)

$$\Delta D''_1 = K''_1\left(\frac{n}{1000}\right)^2, \tag{49}$$

где $K''$ определяется по уравнению (44) или (46) при $\alpha = \frac{D''_1}{D'_1}$ и $D = D'_1$. Приращение наружного диаметра втулки

$$\Delta D'_2 = K'_2\left(\frac{n}{1000}\right)^2, \tag{50}$$

где $K'_2$ по (45) при $\alpha = \frac{D''_2}{D'_2}$ и $D = D'_2$.

Рис. 110. Изменение наружного диаметра втулки и внутреннего диаметра кольца под действием центробежных сил.

При любой скорости должно быть

$$D''_1 + \Delta D''_1 = D'_2 + \Delta D'_2. \tag{51}$$

Для заданной разъединительной скорости ($n_0 > n_{\text{уг}}$) по рис. 110 внутренний диаметр кольца становится равным наружному диаметру втулки и, следовательно, величина необходимого натяга

$$\delta = \Delta D''_1 - \Delta D'_2 = (K''_1 - K'_2)\left(\frac{n_0}{1000}\right)^2. \tag{52}$$

Остаточный натяг при скорости вращения $n$

$$\delta_\omega = \delta\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]. \tag{53}$$

Остаточные деформации вращающегося кольца $\delta_{\omega_1}$ (растяжение) и втулки $\delta_{\omega_2}$ пропорциональны податливостям

$$\delta_{\omega_1} = \delta_{\omega_2}\frac{\lambda''_1}{\lambda'_2} = (\delta_\omega - \delta_{\omega_1})\frac{\lambda''_1}{\lambda'_2}, \tag{54}$$

где $\lambda'_2$ — по (39) при $\alpha = \frac{r_{в2}}{R_{н2}}$, $\lambda''_1$ по (35).

Согласно (53) и (54) $\delta_{\omega_1}$ и $\delta_{\omega_2}$ можно выразить через $\delta$

$$\delta_{\omega_1} = \frac{\delta}{1 + \lambda'_2/\lambda''_1}\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]; \quad \delta_{\omega_2} = \delta_\omega - \delta_{\omega_1} = \frac{\delta}{1 + \lambda''_1/\lambda'_2}\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]. \tag{55}$$

Силы, возникающие во втулке и кольце в результате горячей посадки: полное радиальное давление между кольцом и втулкой

$$Q_\omega = \frac{\delta_{\omega 1}}{\lambda_1''} = \frac{\delta}{\lambda_1'' + \lambda_2'}\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]; \quad (56)$$

контактное давление по посадочной поверхности

$$p_\omega = \frac{Q_\omega}{\pi D_2' b_{min}} = \frac{\delta}{(\lambda_1'' + \lambda_2')\pi D_2' b_{min}} \cdot \left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right] = p_0\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right], \quad (57)$$

где $b_{min}$ — минимальная ширина одной из двух сопрягаемых деталей;

$$p_0 = p_\omega \quad \text{при} \quad n = 0.$$

3. Расчет посадки на передаваемый вращающий момент. Задан максимальный вращающий момент $M_{max}$. Расчет необходимо вести на величину

$$Ms = k_м M_{max}, \quad (58)$$

где

$$k_м = 2 \div 3.$$

Находим необходимое контактное давление

$$p = \frac{200 k_м M_{max}}{\pi \mu D_\delta^2 b_{min}} \ кг/см^2, \quad (59)$$

где $D_\delta$ — посадочный диаметр;

$\mu$ — коэффициент трения между кольцом и втулкой.

| $p$ (в $кг/см^2$) | 600 | 900 | 1200 |
|---|---|---|---|
| $\mu$ | 0,11—0,18 | 0,08—0,12 | 0,06—0,08 |

По найденной величине $p$ определяем посадочный натяг

$$\delta = p(\pi D_\delta b_{min})(\lambda_1'' + \lambda_2'). \quad (60)$$

Фактический натяг

$$\delta_ф = \delta + \Delta\delta.$$

где $\Delta\delta$ — потеря натяга вследствие сминания рисок посадочных поверхностей, оставшихся после обработки. По [68] для черновой обточки $\Delta\delta = 600$ *мк*, для чистовой обточки $\Delta\delta = 60$ *мк*.

4. Напряжения при горячей посадке кольца на втулку при их одинаковой ширине. Напряжения в кольце от центробежных сил собственного веса и веса деталей, связанных с кольцом

$$\sigma_{\omega к} = K_1''\left(\frac{n}{1000}\right)^2 \frac{E}{D_\delta}, \quad (61)$$

где $K_1''$ по (46) при $D = D_\delta$; $\alpha = \frac{r_{в1}}{R_{н1}}$.

Напряжения в кольце от радиальных сил упругости, обусловленных остаточным натягом

$$\sigma_{Qк} = p_\omega \frac{1 + \alpha_к^2}{1 - \alpha_к^2}, \quad (62)$$

где $\alpha_к = \frac{r_{вк}}{R_{нк}} = \frac{r_{в1}}{R_{н1}}$.

Суммарные тангенциальные растягивающие напряжения в кольце

$$\sigma_{к\,max} = \sigma_{\omega к} + \sigma_{Qк}. \quad (63)$$



Максимальные скалывающие напряжения при покое

$$\tau_{0\,max} = \frac{1}{2}(\sigma_{Qк} + p_0), \quad (64)$$

где $p_0$ определяется по (59);
при вращении

$$\tau_{\omega\,max} = \frac{1}{2}(\sigma_{к\,max} + p_\omega). \quad (65)$$

Напряжения на внутренней поверхности втулки от центробежных сил собственного веса (растягивающие)

$$\sigma_{\omega v} = K_2''\left(\frac{n}{1000}\right)^2 \frac{E}{D_2''}, \quad (66)$$

где $K_2''$ определяется по уравнению (46) при $D = D_{нv}$,
$D_{нv} = 2R_{нv}$ — наружный диаметр втулки.

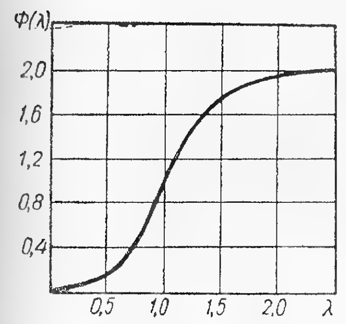



Рис. 111. Функция $\Phi_{(\lambda)}$ для расчета напряжений в цилиндрической втулке, нагруженной на одном конце.

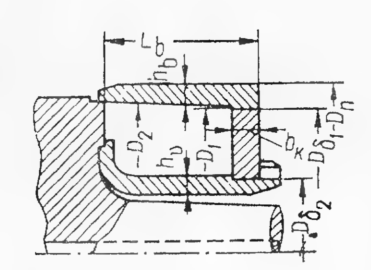


Рис. 112. Расчетные размеры системы бандаж — центрирующее кольцо — центрирующая втулка ротора турбогенератора 100 000 *квт*.

Напряжения от радиальных сил упругости, обусловленных остаточным натяжением $\sigma_\omega$ (сжимающие)

$$\sigma_{Qv} = p_0\left(\frac{2}{1 - \alpha_v^2}\right)\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right], \quad (67)$$

где $\alpha_v = \frac{r_{вv}}{R_{нv}}$.

Суммарные напряжения во втулке

$$\sigma_v = \sigma_{\omega v} - \sigma_{Qv}. \quad (68)$$

5. Массивные бандажи. Расчет массивных бандажей сводится к определению податливостей, деформаций, посадочных натягов и напряжений.

*Податливость* роторного бандажа и центрирующей втулки для случая бандажа, насаженного на центрирующее кольцо и заточку зубцов ротора по [68]

$$\lambda_b = \frac{0{,}292}{E}\Phi(\lambda)\sqrt{\frac{D_b}{h_b}} \ см/кг, \quad (69)$$

где $\Phi(\lambda)$ определяется по рис. 111

$$\lambda = \frac{0{,}5 l_b}{0{,}55\sqrt{D_b h_b}} \quad (70)$$

(обозначения см. на рис. 112).

$$D_b = \frac{1}{2}(D_1 + D_n),$$

где $D_1$ и $D_n$ — внешний и внутренний диаметр бандажа (рис. 112).

Податливость центрирующей втулки

$$\lambda_v = \frac{0,584}{E}\sqrt{\frac{D_v}{h_v^3}}\ \frac{см}{кг}, \qquad (71)$$

где $D_v$ — средний диаметр втулки, *см*;

$h_v$ — средняя толщина втулки, *см*.

*Коэффициенты деформации* от центробежных сил:

для бандажа

$$K_b = \frac{D_{б_1}}{E}\left[4D_{б_1}^2\left(1+\frac{4,5}{\alpha_b^2}\right)10^{-3} + \frac{G_m}{l_b}(1+\alpha_к)\left(\frac{1+\alpha_b^2}{1-\alpha_b^2}+0,27\right)\right]; \qquad (72)$$

для центрирующего кольца на наружной и внутренней поверхности

$$K'_к = \frac{D_{б_1}}{E}\left[4D_{б_1}^2(4,5\alpha_к^2+1)\cdot 10^{-3}\right];$$

$$K''_к = \frac{D_{б_1}}{E}\left[4D_{б_1}^2(4,5+\alpha_к^2)\,\alpha_к 10^{-3}\right]; \qquad (73)$$

для втулки

$$K_v = \frac{D_{б_2}}{E}\left[4D_{б_2}^2(1+4,5\alpha_v^2)\cdot 10^{-3}\right]; \qquad (74)$$

для ротора

$$K_r = \frac{D_z}{E}\left\{4D_z^2(1+4,5\alpha_r^2)10^{-3} + p_н\left[\left(\frac{1+\alpha_r^2}{1-\alpha_r^2}-0,27\right) + \frac{14,5}{N_r}\,\frac{h_1}{c_1-z}\lg\frac{c_1}{z}\right]\right\}. \qquad (75)$$

Здесь $p_н$ — нагрузка на единицу поверхности ротора (считая по дну пазов) от центробежной силы зубцов и меди обмотки:

$$p_н = \sigma_{z\,max}\frac{b_{z\,min}}{t_{z\,min}};$$

$\sigma_{z\,max}$ по (104) или $p_н = \sigma_r$ по (103а);

$N_r$ — число зубцовых делений ротора;

$$\alpha_b = \frac{D_{б_1}}{D_n} = \frac{\text{диаметр посадки бандажа}}{\text{наружный диаметр бандажа}};$$

$$\alpha_к = \frac{D_{б_2}}{D_{б_1}} = \frac{\text{внутренний диаметр центрирующего кольца}}{\text{наружный диаметр центрирующего кольца}};$$

$$\alpha_r = \frac{d}{D_z} = \frac{\text{диаметр центрального отверстия ротора}}{\text{диаметр по дну пазов ротора}};$$

$h_1$, $c_1$ и $z$ — размеры зубца ротора (рис. 113).

*Посадочный натяг*: между центрирующим кольцом и бандажом

$$\delta_1 = (K_b - K'_к)\left(\frac{n_0}{1000}\right)^2; \quad n_0 = 3800 \text{ об/мин}; \qquad (76)$$

между втулкой и центрирующим кольцом

$$\delta_2 = (K'_к - K_v)\left(\frac{n_0}{1000}\right)^2; \qquad (77)$$

для посадки бандажа на заточку зубцов ротора

$$\delta_3 = (K_b - K_r)\left(\frac{n_0}{1000}\right)^2. \qquad (78)$$



Деформация (приращение внутреннего диаметра) бандажа может быть представлена в виде

$$\Delta''_b = K_b\left(\frac{n}{1000}\right)^2 + Q_1\lambda_b. \qquad (79)$$

Первый член представляет деформацию бандажа от центробежных сил собственного веса и веса роторной обмотки, а второй член — деформацию под действием системы дополнительных радиальных сил $Q_1$, растягивающих бандаж и сжимающих центрирующее кольцо.

Для центрирующей втулки также справедливо равенство

$$\Delta'_v = K_v\left(\frac{n}{1000}\right)^2 - Q_2\lambda_v, \qquad (80)$$

где $Q_2$ — система радиальных сил, действующих на поверхности соприкосновения кольца и центрирующей втулки (или вала ротора), сжимающая втулку и растягивающая кольцо.

Силы $Q_1$ и $Q_2$ определяются решением уравнений совместности деформаций.

Приращение наружного и внутреннего диаметров центрирующего кольца:

$$\Delta'_к = K'_к\left(\frac{n}{1000}\right)^2 - Q_1\lambda'_{к_1} + Q_2\lambda'_{к_2}; \qquad (81)$$

$$\Delta''_к = K''_к\left(\frac{n}{1000}\right)^2 - Q_1\lambda''_{к_1} + Q_2\lambda''_{к_2}, \qquad (82)$$

где $\lambda'_{к_1}$ и $\lambda''_{к_1}$ — податливость центрирующего кольца по наружному и внутреннему диаметрам под действием силы $Q_1$;

$\lambda'_{к_2}$ и $\lambda''_{к_2}$ — податливости кольца по наружному и внутреннему диаметрам под действием внутренней силы $Q_2$.

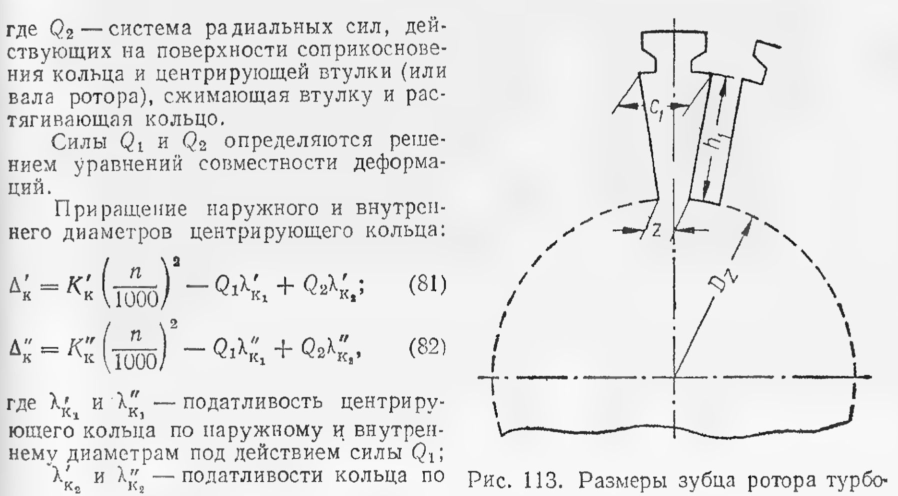



Рис. 113. Размеры зубца ротора турбогенератора.

Так как бандаж и центрирующее кольцо, а также центрирующее кольцо и центрирующая втулка (или вал) имеют до момента разъединения общий диаметр, то можно составить два уравнения совместности деформаций:

$$D''_b + \Delta''_b = D'_к + \Delta'_к; \qquad (83)$$

$$D''_к + \Delta''_к = D'_v + \Delta'_v, \qquad (84)$$

где $D''_b$ и $D'_v$ — внутренний диаметр бандажа и наружный диаметр центрирующей втулки (или вала) в свободном состоянии;

$D'_к$ и $D''_к$ — наружный и внутренний диаметры центрирующего кольца в свободном состоянии.

По рис. 110:

$$D'_к - D''_b = \delta_1; \qquad (85)$$

$$D'_v - D''_к = \delta_2. \qquad (86)$$

Поэтому для любой скорости вращения ротора:

$$\Delta''_b - \Delta'_к = \delta_1; \qquad (87)$$

$$\Delta''_к - \Delta'_v = \delta_2. \qquad (88)$$

Подставляя в (87) и (88) значения приращений из (79), (80), (81) и (82), получим

$$Q_1 = \frac{\delta_1 + \gamma_2'\delta_2 - [K_{\text{б}} - K_{\text{к}}' + \gamma_2' (K_{\text{к}}' - K_v)] \left(\frac{n}{1000}\right)^2}{\lambda_{\text{б}} + \lambda_{\text{к}_1}' - \lambda_{\text{к}_2}' \gamma_2'}; \qquad (89)$$

$$Q_2 = \frac{\delta_2 + \gamma_1\delta_1 - [K_{\text{к}}'' - K_v + \gamma_1'' (K_{\text{б}} - K_{\text{к}}')] \left(\frac{n}{1000}\right)^2}{\lambda_v + \lambda_{\text{к}_2}'' - \lambda_{\text{к}_1}'' \gamma_1''}, \qquad (90)$$

где

$$\gamma_2' = \frac{\lambda_{\text{к}_2}'}{\lambda_{\text{к}_2}'' + \lambda_v}; \quad \gamma_1 = \frac{\lambda_{\text{к}_1}''}{\lambda_{\text{к}_1}' + \lambda_{\text{б}}}.$$

*Напряжения* складываются из суммы напряжений от сил натяга $Q_1$ и $Q_2$, зависящих от скорости и имеющих максимум при $n = 0$ и от центробежных сил.

Напряжения при $n = 0$:

в бандаже (растягивающие)

$$\sigma_{\text{б}Q} = E\lambda_{\text{б}} Q_{10} \cdot \frac{1}{D_{\text{б}}}, \qquad (91)$$

где $Q_{10}$ — радиальное усилие при $n = 0$ по (89);

в центрирующем кольце на внутренней кромке (сжимающие)

$$\sigma_{\text{к}Q\,\max} = \frac{0{,}32}{b_{\text{к}}} \left[\frac{H_2}{D_{\text{б}}} Q_{20} - \frac{H_2 + 1}{D_{\text{б}1}} Q_{10}\right], \qquad (92)$$

где $Q_{20}$ — радиальное усилие при $n = 0$ по (90);

коэффициент $H_2$ определяется по рис. 114:

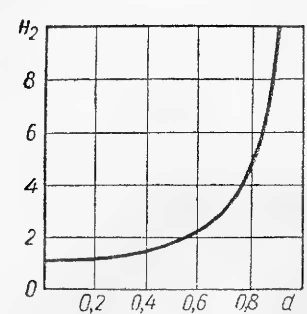


Рис. 114. Коэффициент $H_2$ для расчета податливостей центрирующего кольца.

в месте посадки на втулку центрирующего кольца (сжимающие)

$$\sigma_{vQ} = \lambda_v E Q_{20} \frac{1}{D_v}. \qquad (93)$$

Напряжения от центробежной силы при угонной скорости $n_{\text{уг}} = 1{,}2 n_N$ на внутренней кромке бандажа (максимальные растягивающие)

$$\sigma_{\text{б}n} = K_{\text{б}} \frac{E}{D_{\text{б}1}} \left(\frac{n_{\text{уг}}}{1000}\right)^2; \qquad (94)$$

в центрирующем кольце на внутренней кромке

$$\sigma_{\text{к}n} = K_{\text{к}}'' \frac{E}{D_{\text{б}_2}} \left(\frac{n_{\text{уг}}}{1000}\right); \qquad (95)$$

в центрирующей втулке

$$\sigma_{vn} = K_v \frac{E}{D_{\text{б}_2}} \left(\frac{4{,}5 + \alpha_v^2}{1 + 4{,}5\alpha_v^2}\right) \left(\frac{n_{\text{уг}}}{1000}\right)^2; \qquad (96)$$

суммарные напряжения

$$\sigma_{\text{б}} = \sigma_{\text{б}Q} + \sigma_{\text{б}n};$$

$$\sigma_{\text{к}} = \sigma_{\text{к}Q} + \sigma_{\text{к}n};$$

$$\sigma_v = \sigma_{vQ} + \sigma_{vn}.$$

Для турбогенератора 100 *Мвт* напряжения по данным [68] приведены в табл. 17.



*Таблица 17*

**Напряжение в деталях роторов турбогенераторов**

| Детали | Напряжение (в $кг/см^2$) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | при покое | при $n$ = 3600 об/мин | | |
| | | от $Q_1$ и $Q_2$ | от центробежных сил | суммарное |
| Бандаж | 2900 | 340 | 4670 | 5010 |
| Центрирующее кольцо у внутренней кромки | 880 | — 57 | 1160 | 1103 |
| Центрирующая втулка | 2940 | —700 | 850 | 150 |

В табл. 18, заимствованной из [68], даны рекомендуемые натяги при горячих посадках в турбогенераторах.

*Таблица 18*

**Натяги при горячих посадках в турбогенераторах**

| Типы турбогенераторов | Натяг посадки бандажа (в *мм*) | | Натяг посадки центрирующего кольца (в *мм*) | |
|---|---|---|---|---|
| | в свободном состоянии, $\delta_1$ | если центрирующее кольцо предварительно насажено на ротор, $\delta_1'$ | в свободном состоянии, $\delta_2$ | если бандаж предварительно насажен на центрирующее кольцо, $\delta_2'$ |
| Т2-3, 5-2 | 0,65—0,50 | 0,80—0,65 | 0,21—0,13 | — |
| Т2-6-2 | 0,72—0,52 | 0,80—0,65 | 0,27—0,17 | — |
| Т2-12-6 | 0,90—0,80 | 1,10—1,00 | 0,35—0,25 | — |
| Т2-25-2 | 1,30—1,20 | 1,60—1,50 | 0,48—0,34 | 0,65—0,55 |
| Т2-50-2 | 1,70—1,60 | 2,00—1,90 | 0,60—0,50 | 0,82—0,72 |
| Т2-100-2 | 1,70—1,60 | 1,75—1,65 | 0,55—0,45 | 0,82—0,72 |
| ТВ-100-2 | 1,70—1,60 | 1,75—1,65 | 0,55—0,45 | 0,86—0,76 |

6. Расчет прочности хвостовой части ротора при номинальном режиме (рис. 115).

Номинальный вращающий момент

$$M_{\tau} = 97\,500 \frac{P}{n},$$

где $P$ — номинальная мощность, *квт*;

$n$ — скорость вращения, об/мин.

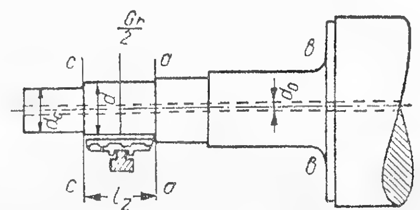


Рис. 115. К расчету прочности хвостовины ротора.

Изгибающий момент в сечении $a$ $a$

$$M = \frac{G_r l_2}{4} \ кгсм, \qquad (97)$$

где $G_r$ — вес собранного ротора.

Момент сопротивления шейки

$$W = \frac{\pi}{64} \cdot \frac{2(d^4 - d_v^4)}{d} \ см^3. \qquad (98)$$

Нормальные напряжения изгиба

$$\sigma = \frac{M}{W}. \qquad (99)$$

Касательные напряжения в сечении *аа*

$$\tau = \frac{M_\tau}{2W}. \qquad (100)$$

Максимальные напряжения с учетом коэффициентов концентрации $k_\sigma$ и $k_\tau$, определяемым по рис. 116 и 117,

$$\sigma_{max} = k_\sigma \sigma \text{ и } \tau_{max} = k_\tau \tau. \qquad (101)$$

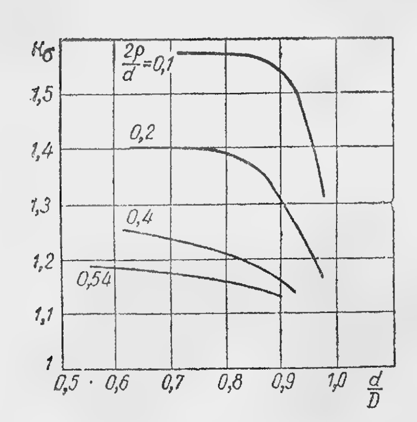



Рис. 116. Коэффициенты концентрации напряжений при изгибе круглых образцов (по Н. Н. Афанасьеву).

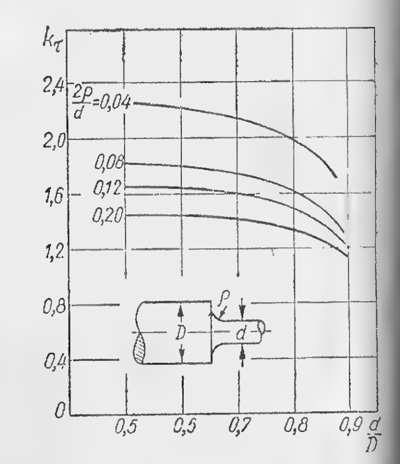



Рис. 117. Коэффициенты концентрации касательных напряжений при кручении цилиндрических образцов (по С. П. Тимошенко).

Полученные максимальные напряжения следует сопоставить с пределом усталости материала при кручении $\tau'_w$ (табл. 9), по И. А. Одингу [78]

$$\frac{\tau'_w}{k_0} \geqslant \sqrt{\frac{\varepsilon_w^2\sigma_{max}^2}{8} + \frac{\varepsilon_w \sigma_{max}}{8}\sqrt{\varepsilon_w^2\sigma_{max}^2 + 4\tau_{max}^2}}, \qquad (102)$$

где $\varepsilon_w$ — коэффициент эквивалентности знакопеременных касательных напряжений при кручении и изгибе (для турбороторной стали $\varepsilon_w = 1,3$);

$k_0$ — коэффициент запаса по усталостной прочности ($k_0 \geqslant 2$—1,7).

Во время пуска при переходе через критические скорости $\sigma_{max}$ возрастает в 5—6 раз (в сечении *вв*), $\sigma_{вв} = (5—6)\, \sigma_{max}$ должно быть меньше $0,7\sigma'_s$, где $\sigma'_s$ — предел текучести при изгибе.

7. Тело ротора. Наибольшие напряжения имеют место в цельнокованых роторах быстроходных турбогенераторов. Расчет напряжений в теле ротора [2, 12] приводит к заключению, что максимальными напряжениями являются тангенциальные напряжения в центральном отверстии ротора. Это, на первый взгляд кажущееся странным, явление физически объясняется весьма просто. При вращении цилиндра с толстыми стенками относительные удлинения волокон будут больше у центрального отверстия, чем на внешней поверхности. Относительное удлинение у центрального отверстия равно



$$\varepsilon_0 = \frac{\delta_0}{r_0},$$

где $\delta_0$ — приращение $r_0$. Соответствующее удлинение у поверхности равно

$$\varepsilon_a = \frac{\delta_a}{r_a}.$$

Так как при расширении цилиндра объем его остается неизменным, то

$$\frac{\pi}{4}(r_a^2 - r_0^2) \approx \frac{\pi}{4}[(r_a + \delta_a)^2 - (r_0 + \delta_0)^2],$$

откуда, пренебрегая произведениями приращений, получаем

$$\frac{\delta_a}{\delta_0} = \frac{r_0}{r_a}.$$

Относительные удлинения $\varepsilon_a = \frac{\delta_a}{r_a}$ и $\varepsilon_0 = \frac{\delta_0}{r_0}$, а следовательно, и напряжения будут относиться как $\left(\frac{r_0}{r_a}\right)^2$, т. е. $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} = \left(\frac{r_0}{r_a}\right)^2$.

Тангенциальное напряжение в центральном отверстии по [1, 2] складывается из суммы напряжений от веса зубцов и обмотки и напряжений от собственного веса тела ротора

$$\sigma_t = 2\sigma_r \frac{1}{1-\alpha_0^2} + 0,825\,\frac{\gamma v_a'^2}{981}\,(1 + 0,212\alpha_0^2)\ кг/см^2, \qquad (103)$$

где $\sigma_r$ — среднее радиальное напряжение по дну пазов от веса зубцов и обмотки:

$$\sigma_r = \frac{(F_z + F_{Cu})N_R}{\pi D'_R}, \qquad (103\,а)$$

причем $N_R$ — число делений зубцов ротора;

$\alpha_0 = \frac{d_0}{D'_R}$ — отношение диаметра отверстия к диаметру ротора по низу пазов;

$\gamma$ — 0,00785 *кг/см³* — плотность стали ротора;

$v'_a$ — окружная скорость ротора по низу пазов.

Напряжения в роторах при $n = n_{уг}$ должны быть не выше 0,7 предела текучести для сталей соответствующей марки.

8. Зубцы и клинья. Наибольшие напряжения получаются у основания зубцов и в клиньях, крепящих обмотку. Напряжение у основания зубца

$$\sigma_{z\,max} = \frac{F_z + F_{Cu}}{b_{z\,min}} < 0,7\sigma_s, \qquad (104)$$

где $b_{z\,min}$ — ширина зубца у основания;

$F_z$ и $F_{Cu}$ — центробежные силы зубца, меди паза и клина на 1 *см* длины:

$$F_z = \frac{1}{981} G_z \omega^2 R_z \text{ и } F_{Cu} = \frac{1}{981} G_{Cu}\omega^2 R_{Cu}, \qquad (105)$$

$\omega = \omega_{уг} = 2\pi n_{уг}$, $n_{уг}$ — об/сек;

$G_z$ и $G_{Cu}$ — веса зубца и меди паза на 1 *см* длины, *кг*;

$R_z$ и $R_{Cu}$ — радиусы центров тяжести зубца и обмотки, *см*.

Напряжения в клиньях на смятие равны центробежной силе меди $F_{Cu}$ паза на 1 *см* длины плюс центробежная сила самого клина, деленная на поверхность смятия (допускаемые напряжения см. ниже). Материал клиньев для нормальных машин — бук или гетинакс, для турбогенераторов — дуралюминий, бронза и сталь.

Максимальные скалывающие напряжения

$$\tau_{max} = \frac{Q}{h}\psi_\tau, \tag{106}$$

где $Q$ — нагрузка на единицу длины клина, *кг*;

$\psi_\tau = f(\alpha)$ — определяется по рис. 118;

$\alpha$ — угол клина (рис. 119);

$h$ — высота клина.

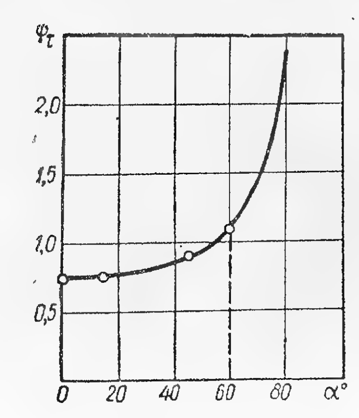



Рис. 118. Функция $\psi_\tau$ для расчета максимальных скалывающих напряжений в пазовом клине.

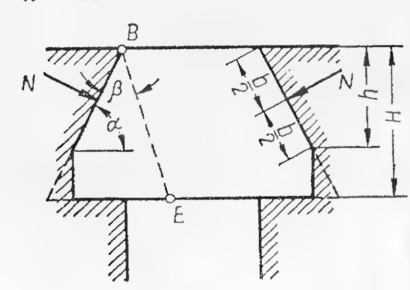



Рис. 119. Пазовый клин с порогом.

При трапецоидальной форме клина, показанной на рис. 119, формула остается справедливой при подстановке вместо $h$ высоты скошенной части $H$.

Допускаемые напряжения для бука $\tau_{max} < 20$ *кг/см²*, для гетинакса $\tau_{max} < 150$ *кг/см²*, для стали, дуралюминия и бронзы $\tau_{max} \leqslant 0{,}6\tau'_s$.

Сжимающие напряжения в точке $E$

$$\sigma_E = -\frac{Q}{H^2}\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\alpha}[3m\sin(\alpha+\beta) - H\cos\beta], \tag{107}$$

где $m = \dfrac{H}{2\sin\alpha}$.

9. Бандажи роторов без учета посадочных напряжений. Напряжения в цельнокованых бандажах получаются от собственных центробежных сил ($\sigma'$) и от давления лобовых частей обмотки ротора ($\sigma''$)

$$\sigma' = 0{,}825\frac{\gamma}{981}v_б^2(1 + 0{,}212\alpha_0^2)\ кг/см^2; \tag{108}$$

$$\sigma'' = \frac{F_л}{2\pi}\frac{1}{S_б};\quad \sigma = \sigma' + \sigma'',$$



где $v_б$ — скорость на окружности бандажа, *см/сек*;

$$\alpha_0 = \frac{D_{б_1}}{D_n}, \tag{109}$$

$F_л = \dfrac{G_л}{981}\omega^2 R_л$ — центробежная сила лобовой части;

$G_л$ и $R_л$ — вес лобовой части и радиус инерции;

$S_б$ и $D_б$, — опасное сечение бандажа на разрыв и диаметр отверстия бандажа.

10. Крепление полюсов ротора к ободу. Полюса крепятся обычно на Т-образных хвостах. В приложении IX дана таблица допускаемых нагрузок и нормализованные размеры хвостов.

Напряжения в хвостах

$$\sigma_{хв} = \frac{P_p}{S_{хв}n_{хв}},$$

где $P_p$ — центробежная сила одного полюса

$$P_p = \frac{Q'_п}{981}\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 n_{уг}^2 R_p; \tag{110}$$

$Q'_п$ — вес полюса с обмоткой, *кг*;

$R_p$ — радиус полюса по центру тяжести, *см*;

$S_{хв}$ — сечение хвоста, *см²*;

$n_{хв}$ — число хвостов на полюс;

$n_{уг}$ — об/мин.

Разрывающее усилие в сечении обода равно сумме разрывающих усилий от центробежной силы полюсов и самого обода

$$C = \frac{P_{об} + 2pP_p}{2\pi}, \tag{111}$$

где

$$P_{об} = \frac{G_{об}}{981}\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 n_{уг}^2 R_i;$$

$R_i$ — радиус по центру тяжести сечения обода, *см*;

$n_{уг}$ — об/мин.

Среднее растягивающее напряжение

$$\sigma = \frac{C}{F'_{об}} < 1500\ кг/см^2, \tag{112}$$

где $F'_{об}$ — опасное сечение обода. Точный расчет обода см. в примере расчета гидрогенератора.

11. Литые и сварные роторы со спицами. Растягивающее напряжение обода приближенно можно определить, как и выше, по формуле (111).

Среднее растягивающее напряжение в спицах при числе спиц $m$ по [68]

$$\sigma_{сп} = \frac{C}{\left[m\left(\frac{\lambda_v}{\lambda_{об}} + 1\right) + 2\frac{\lambda_{сп}}{\lambda_{об}}\right]F'_{сп}}, \tag{113}$$

где $F'_{сп}$ — опасное сечение спицы.

Податливости:

спицы

$$\lambda_{сп} = \frac{l_{сп}}{F'_{сп}E}; \qquad (114)$$

втулки

$$\lambda_v = 0{,}32\ \frac{R_v}{F_vE}; \qquad (115)$$

обода

$$\lambda_{об} = 0{,}32\ \frac{R_{об}}{F_{об}E}, \qquad (116)$$

где $R_v$, $F_v$ — радиус и сечение втулки;

$l_{сп}$, $F'_{сп}$ — длина и сечение спицы;

$R_{об}$, $F_{об}$ — радиус и сечение обода.

Растягивающее напряжение в сечении втулки $F_v$ ротора (без учета изгиба)

$$\sigma_v = \sigma_{сп} \cdot \frac{F_{сп}}{F_v}\frac{m}{2\pi}. \qquad (117)$$

## 8-5. НАПРЯЖЕНИЯ В КОЛЛЕКТОРАХ

Расчет коллекторов представляет самостоятельную и сложную задачу [1, 68].

В быстроходных и мощных машинах рассчитываются: 1) напряжения растяжения, кручения и изгиба нажимных шайб; 2) напряжения растяжения и изгиба стяжных болтов; 3) напряжения в пластинах на изгиб и срез хвостов; 4) напряжения в бандажах коллектора (для быстроходных машин) и их смещения; 5) температурные напряжения.

Размеры коллекторной пластины и учет износа. Высота пластины по [1]

$$h = k\sqrt[4]{D_к} - 1\ см,\ \text{или}\ h = 0{,}12D_к\ см, \qquad (118)$$

где $k = 2{,}8 \div 2{,}2$;

$D_к$ — диаметр коллектора, *см*.

Допускаемый износ

$$\varepsilon = 0{,}5\sqrt[4]{D_к}\ см. \qquad (119)$$

Длина пластины (см. рис. 193,*а*)

$$l'_к = l_к + l''_к + l_п.$$

Удельное сжатие пластин коллектора [1]

$$p = 60 + 5\left(\frac{n}{1000}\frac{D_к}{10}\right)^{1,5}\ кг/см^2, \qquad (120)$$

где $n$ — в об/мин.

По [69]

$$p = 50 + 3{,}5v_{к.уг},$$

где

$$v_{к.уг} = 1{,}2v_к; \quad v_к = \frac{\pi D_к n}{60}\ м/сек.$$



Силы, действующие на коллектор (рис. 193).

Силы арочного распора $F_р$.

давление на пластину (на одну сторону)

$$P_к = pS_к, \qquad (121)$$

где $S_к$ — боковая поверхность одной коллекторной пластины;

$$F_р = 2P_к \sin\theta \approx 2P_к\frac{\pi}{K} \qquad (122)$$

$$\sum F_р = KF_р = 2\pi P_к = 2\pi pS_к. \qquad (123)$$

Центробежные силы, действующие на пластины,

$$\sum F_\omega = \frac{G'_к}{g}\omega^2 R_i, \qquad (124)$$

где $G'_к$ — вес всех пластин с изоляцией;

$R_i$ — радиус инерции пластин:

$$R_i = R_{ср} + \frac{h}{12R_{ср}};$$

$R_{ср}$ — средний радиус коллекторных пластин.

Напряжения на растяжение нажимных шайб

$$\sigma_ш = \frac{\Sigma F_\omega + \Sigma F_р}{2\pi S_ш}, \qquad (125)$$

где $S_ш$ — площадь сечения шайбы.

Напряжения на растяжение стяжных болтов. Осевая составляющая силы, приходящаяся на болты по рис. 193,

$$\sum F_s = 0{,}5\left(\sum F_\omega + \sum F_р\right)\operatorname{tg}\alpha. \qquad (126)$$

Напряжения в стяжных болтах

$$\sigma_б = \frac{\Sigma F_s}{mq_б}, \qquad (127)$$

где $m$ — число болтов;

$q_б$ — сечение одного болта:

$$q_б = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Напряжения в хвостах пластин на изгиб в точке $A'$ (рис. 193)

$$\sigma_q = \frac{M_{изг}}{W_{1изг}}, \qquad (128)$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент, равный

$$M_{изг} = \frac{\Sigma F_\omega + \Sigma F_р}{2K}c.$$

Момент сопротивления пластины как балки прямоугольного сечения

$$W_{1изг} = \frac{1}{6}\beta' h_1^2,$$

где $\beta'$ — средняя толщина пластины;

$h_1$ — высота «ласточкиного хвоста».

Напряжение от изгиба в середине длины пластины. Это напряжение приближенно рассчитывается так же, как для балки, опертой по концам и нагруженной равномерной нагрузкой

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{\Sigma F_{\omega} + \Sigma F_{\text{р}}}{W_{\text{изг}}} \frac{l_0}{8K} < 1800 \ кг/см^2; \qquad (128а)$$

$$W_{\text{изг}} = \frac{1}{6} \beta' h^2,$$

где $h$ — высота изношенной пластины.

При этом методе расчета получатся завышенные значения $\sigma_{\text{п}}$. Более точно следует считать, например, по [137]. Оценка выполнимости коллектора с «ласточкиными хвостами» дана ниже.

Напряжения смятия в миканитовых манжетах

$$\sigma_{\text{м}} = \frac{\Sigma F_{\omega} + \Sigma F_{\text{р}}}{2Ka_{\text{р}} \cos \alpha} < 500 \ кг/см^2, \qquad (128б)$$

где $a$ — длина опорной поверхности манжеты (рис. 193).

Температурные напряжения. Согласно [1] температурные напряжения, получающиеся вследствие разницы тепловых расширений меди коллектора и стали конструктивных деталей, увеличивают напряжения на 10—15%.

Напряжения в быстроходных коллекторах с бандажными кольцами. Расчет напряжений в пластинах и в массивных бандажных кольцах (рис. 120) представляет весьма сложную задачу [68]. Приближенно (с преувеличением напряжений) можно рассчитать напряжение в пластине, как в балке с равномерной нагрузкой и с числом опор, равным числу бандажных колец. Для двух колец справедлива формула (128а). Для трех и более колец возможно найти максимальный изгибающий момент путем построения эпюры (рис. 120).

Рис. 120. Коллектор с тремя бандажными кольцами:

*а* — примерная форма упругой линии; *б* — схема нагрузки; *в* — эпюра изгибающего момента; *г* — эпюра перерезывающих сил.

Напряжения в бандажных кольцах складываются из суммы напряжений от центробежных сил коллекторных пластин и самих колец и напряжений от сил натяга. По данным экспериментальных исследований удельное давление колец принимается $p = 400 \div 600 \ кг/см^2$.

Среднее давление каждого кольца

$$F'_{\text{р}} = \frac{F_{\text{р}}}{m},$$

где $m$ — число колец;

$F_{\text{р}}$ — сила арочного распора по (122).

Принимая давления всех колец равными, получим натяг

$$\delta = F'_{\text{р}} \lambda_b + 2y + 0{,}235\Delta_i; \quad (\delta \approx 0{,}2 \ см),$$

где $\lambda_b$ — податливость бандажа, отнесенная к его внутреннему диаметру [формула (37) для $\lambda''_2$];



$y$ — радиальная посадка коллектора под бандажным кольцом; по [68] $y$ изменяется в пределах от 0,025 до 0,098 *см*;

$0{,}235\Delta_i$ — сжатие миканитового пояска под бандажным кольцом;

$\Delta_i$ — толщина пояска ($\Delta_i \approx 0{,}25$ *см*).

Среднее напряжение на растяжение в бандажных кольцах можно теперь определить как

$$\sigma_b = \frac{\Sigma F_{\omega} + \Sigma F_{\text{р}}}{2\pi S_b} + \frac{F_{\omega b}}{2\pi S_b},$$

где $S_b$ — сечение всех $m$ колец;

$\Sigma F_{\omega}$ — определяется по формуле (124).

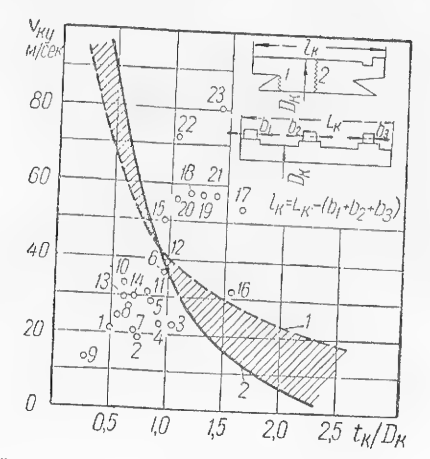



Рис. 121. «Предельные кривые» выполнимости коллекторов:

*1* — по прочности «ласточкиных хвостов»; *2* — по прочности пластин в пролете.

Последнее слагаемое учитывает напряжения от центробежной силы собственного веса бандажных колец

$$F_{\omega b} = \frac{G_b}{g} \omega^2 R_{ib},$$

где $R_{ib}$ — радиус инерции кольца; $G_b$ — вес всех колец.

Критерий выполнимости коллекторов различных конструкций по Б. Н. Красовскому [69]. В зависимости от размеров и окружных скоростей машины конструкции коллекторов могут быть четырех типов:

1) с «ласточкиными хвостами» без бандажных колец;
2) с «ласточкиными хвостами» и одним бандажным кольцом;
3) с тремя бандажными кольцами;
4) с четырьмя бандажными кольцами.

На основании расчетов можно получить «предельные кривые» выполнимости коллекторов различных конструкций (рис. 121). На этом рисунке номера точек соответствуют порядковым номерам машин, приведенным в табл. 19. Область выполнимости коллекторов без бандажных колец — ниже кривых *1—2*.

*Таблица 19*

**Данные о коллекторах электрических машин**

| № по пор. | Мощность машины (в *квт*) | Испытательная скорость вращения (в об/мин) | Конструкция коллектора | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 2400 | Тип 1 | Машины серии ПН |
| 2 | 30 | 1900 | То же | |
| 3 | 50 | 1760 | » | Судовые электрические машины |
| 4 | 100 | 1800 | » | |
| 5 | 150 | 1800 | » | |
| 6 | 300 | 1800 | » | |
| 7 | 500 | 600 | » | |
| 8 | 1000 | 625 | » | |
| 9 | 100 | 650 | » | |
| 10 | 20 | 4000 | » | |
| 11 | 160 | 1920 | » | Машины серии П |
| 12 | 300 | 1920 | » | |
| 13 | 170 | 1250 | » | |
| 14 | 250 | 1250 | » | |
| 15 | 120 | 4800 | Тип 2 | Электродвигатель насоса |
| 16 | 550 | 900 | То же | Генератор для электролиза |
| 17 | 100 | 4800 | Тип 3 | Турбовозбудители и судовые турбогенераторы |
| 18 | 145 | 3600 | То же | |
| 19 | 300 | 3600 | » | |
| 20 | 600 | 2120 | » | |
| 21 | 70 | 6740 | » | Электротурбокомпрессор |
| 22 | 700 | 2700 | » | Судовой турбогенератор |
| 23 | — | 4800 | Тип 4 | Генератор ХЭМЗ |

Испытательная угонная скорость

$$v_{\text{к.уг}} = 1{,}2\,\frac{\pi D_{\text{к}} n_N}{6000}\ \text{м/сек},$$

где $D_{\text{к}}$ — диаметр коллектора, *см*;
$n_N$ — об/мин.

## 8-6. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СТАТОРОВ

1. Нажимная плита, стяжные болты, нажимные пальцы и сегменты. Железо статора прессуется и стягивается болтами. В некоторых машинах (например в турбогенераторах) с торцовых частей статора имеются нажимные пальцы и массивные нажимные плиты (рис. 122). В других машинах, особенно с большим диаметром статора (например в гидрогенераторах), вместо массивной плиты делаются отдельные нажимные сегменты, к которым привариваются нажимные пальцы.

Удельное давление сжатия статорного железа по [1] можно принять $p_{\text{уд}} = 12{,}5$ *кг/см²*.



По [12] полная сила сжатия в тоннах должна быть пропорциональна объему железа статора $V_{\text{Fe}}$ в $м^3$ и равна

$$\Sigma P = 56 V_{\text{Fe}} \quad \text{и} \quad p_{\text{уд}} = \frac{4\Sigma P\,1000}{\pi (D_{\text{пл}}^2 - D_{\text{пл}}'^2)}\ \text{кг/см}^2, \qquad (129)$$

где $D_{\text{пл}}$ и $D'_{\text{пл}}$ — внешний и внутренний диаметр плиты.

Расчет массивной нажимной плиты может быть приведен к случаю расчета кольца, нагруженного выкручивающим моментом (рис. 106). Максимальное растягивающее напряжение по формуле (11)

$$\sigma_{max} = \frac{M_л}{I_y} x_m, \qquad (130)$$

где $I_y$ — момент инерции сечения плиты относительно оси $y$;
$x_m$ — расстояние по оси $x$ от центра тяжести плиты до наиболее удаленной внешней поверхности плиты;
$M_л$ — ломающий момент, который может быть определен по силе, действующей на единицу длины окружности, проходящей через центр тяжести сечения нажимного кольца радиусом $R_m$,

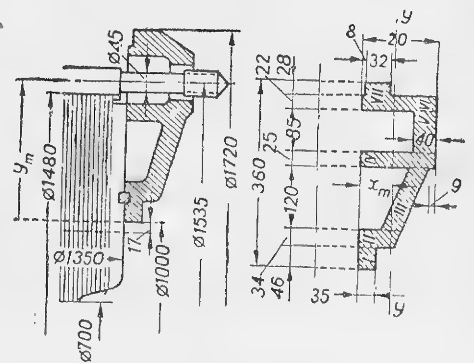


Рис. 122. Нажимная плита статора турбогенератора.

$$M_л = \frac{\Sigma P}{2\pi} y_m = \frac{\Sigma M}{2}, \qquad (131)$$

где $y_m$ — расстояние от оси стягивающих болтов до края плиты (рис. 122.)

Например, для статора турбогенератора (рис. 122) $\Sigma M = 2{,}17 \times 10^6$ *кгсм*; $I_y = 2060$ *см⁴*; $x_m = 5{,}85$ *см*; $\sigma = 980$ *кг/см²*.

По второму методу расчета плиты напряжение в плите

$$\sigma = p_{\text{уд}} \left(\frac{D_{\text{пл}}}{2\Delta_{\text{пл}}}\right)^2 \kappa_1, \qquad (132)$$

где $\Delta_{\text{пл}}$ — толщина плиты;
$\kappa_1$ — функция отношения $\alpha = \frac{D_{\text{пл}}}{D'_{\text{пл}}}$ (рис. 123).

Для более точных расчетов следует учитывать упругость пакетов стали [135].

Растягивающее напряжение в стяжных болтах

$$\sigma_б = \frac{\Sigma P}{n_б q_б}, \qquad (133)$$

где $\sigma_б$ — должно быть меньше $0{,}86\sigma_s$, $\sigma_s$ — предел текучести при растяжении для материала болтов;
$n_б$ и $q_б$ — число болтов и сечение одного болта.

Р а с ч е т  н а ж и м н ы х  п а л ь ц е в  и  н а ж и м н ы х  с е г м е н т о в. Напряжение пальцев на сжатие

$$\sigma = \frac{\Sigma P}{Zbl}, \qquad (134)$$

где $Z$ — число пальцев;

$b$, $l$ — ширина и длина пальца.

При расчете напряжения на изгиб пальца считаем, что сила приложена к середине выступающей части пальца (рис. 124).

Изгибающий момент

$$M = \frac{\Sigma P}{Z} \frac{d + 0,5c}{2}. \qquad (135)$$

Момент сопротивления пальца

$$W = \frac{bh^2}{6}. \qquad (136)$$

Наибольшее растягивающее напряжение

$$\sigma = \frac{M}{W}. \qquad (137)$$

Расчетная ширина сегмента по окружности центров болтов

$$B = B_1 - n_1 d_1,$$

Рис. 123. График $\kappa_1 = f(\alpha)$.

где $n_1$ и $d_1$ — число и диаметр болтов на один сегмент.

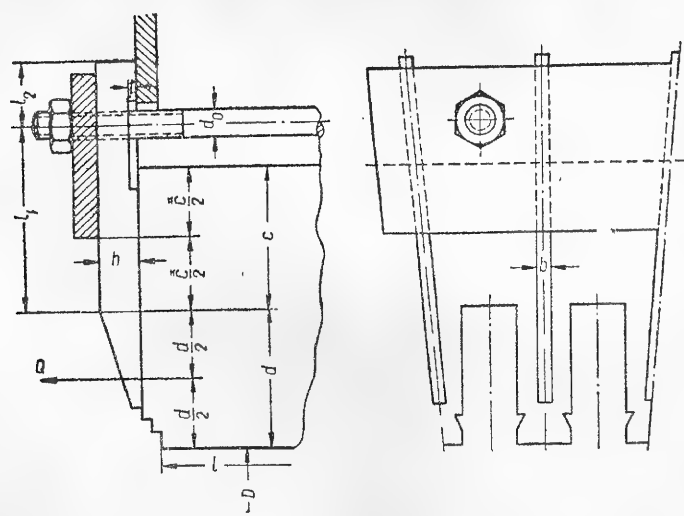


Рис. 124. Нажимные пальцы.

Напряжение на изгиб сегмента (приближенно)

$$\sigma = \frac{\sum P n'_{п} l_c}{8 W_c Z}. \qquad (138)$$



Здесь $n_п$ — число пальцев на сегмент;

$l_c$ — длина сегмента (в радиальном направлении);

$W_c$ — момент сопротивления сегмента на изгиб:

$$W_c = \frac{b\Delta_c^2}{6};$$

$b$, $\Delta_c$ — ширина и толщина сегмента.

2. Р а с ч е т  с т а н и н ы  с т а т о р а  н а  ж е с т к о с т ь  и  к р е п л е н и е  к  ф у н д а м е н т у. Жесткость на изгиб от собственного веса для горизонтальных машин согласно [1] проверяется по соотношению

$$I \geqslant \frac{G_{ст} R_н^2}{22\,500} \qquad (139)$$

или

$$I \geqslant \frac{0,58 D^2 l R_н}{E}, \qquad (139а)$$

где $I$ — момент инерции сечения станины относительно нейтральной оси, $см^4$;

$R_н$ — радиус нейтрального слоя сечения станины, $см$;

$G_{ст}$ — вес станины, $кг$;

$E = 0,85 \cdot 10^6$ — модуль для чугуна;

$E = 2 \cdot 10^6$ — модуль для стали;

$D$ и $l$ — диаметр и длина якоря, $см$.

Для вертикальных машин $I$ может быть около 0,9 от (139а).

Согласно рис. 125 имеем

$$R_н = R_0 + a_0,$$

где $R_0$ — внутренний радиус станины;

$a_0$ — расстояние нейтральной оси от $R_0$:

$$a_0 = \frac{\sum S_i c_i}{\sum S_i}.$$

$$I = \sum I_i + \sum a_i^2 S_i; \quad a_i = c_i - a_0,$$

где $I_i$ - момент инерции данной $i$-й части сечения относительно своей нейтральной оси;

$S_i$ — площадь $i$-й части сечения;

$a_i$ — расстояние нейтральной оси $i$-го сечения от общей нейтральной оси ($c_i$ — соответственно расстояние от $R_0$).

Рис. 125. К расчету станины статора на жесткость.

Для асинхронных машин

$$I \geqslant \frac{R_и l_c}{9000}, \qquad (139б)$$

где $R_и$ — радиус инерции сечения, $см$;

$l_c$ — длина станины.

К р е п л е н и е  с т а н и н ы  к  ф у н д а м е н т н о й  п л и т е должно быть рассчитано на напряжение, разрывающее болты при внезапном коротком замыкании. На статор передается полный момент вращения

$$M_{к.з} = \frac{1}{x''_d} M_N; \qquad (140)$$

где, при

$$x''_d = 0{,}1 \quad M_{к.з} = 10 M_N.$$

Если сечение всех болтов $S = nq_б$, то полная сила, разрывающая болты, равна

$$F = \frac{M_{к.з}}{R_0} - \frac{1}{2} G_{ст}, \tag{141}$$

и напряжение в болтах будет

$$\sigma = \frac{F}{nq_б} < \sigma_{доп}.$$

3. Расчет пружинного основания станин. Иногда для предотвращения чрезмерных напряжений на болты или, чаще, для успокоения вибраций и шума машины ее ставят на пружинное основание.

Пусть момент вращения от электромагнитных или механических сил, действующих на статор машины, может быть представлен рядом

$$M = M_0 + \sum M_\nu \sin(\nu\omega t + \varphi_\nu) = \sum M_\nu.$$

Постоянная часть момента $M_0$ создает постоянное усилие на болты, крепящие статор. Переменная часть является причиной вынужденных колебаний. Если статор массой $m$ помещен на пружинное основание (стальные пружины) с жесткостью $k$, то уравнение колебаний для угла закручивания будет

$$\varphi'' + a_m\varphi' + \omega_0^2\varphi = \omega_0^2 \sum \frac{M_\nu}{k}, \tag{142}$$

решение которого

$$\varphi = \sum \varphi_\nu = \sum \beta_\nu \frac{M_\nu}{k} \sin(\nu\omega t + \varphi_\nu - \psi_\nu), \tag{143}$$

где $\beta_\nu$ — находим по уравнению (183).

Если угловая частота $\omega_0$, равная $\sqrt{\frac{k}{m}}$, сделана достаточно малой за счет подбора жесткости пружин, то величина $\beta_\nu$, а следовательно, и амплитуды колебаний, могут быть уменьшены. Особенно быстрое успокоение наблюдается для высоких частот. Правильный выбор жесткости пружинного основания для ослабления шума может быть сделан, например, в результате записи колебаний и определения частот наиболее нежелательных вынуждающих колебаний.

4. Бандажные кольца статора. Полная сила, разрывающая сечение всех колец при коротком замыкании,

$$F = \frac{\partial A_л}{\partial D} \frac{1}{2\pi}\ дж/см, \tag{144}$$

где $A_л = \frac{L_л}{2}[(2I_m)^2 + I_m^2 + I_m^2] = 3L_л I_m^2$ — максимум запаса электрокинетической энергии тока при трехфазном коротком замыкании (при этом учитывается максимум асимметричного тока в одной фазе $2I_m$; одновременно в других фазах ток равен $I_m$).

Далее

$$\frac{\partial A_л}{\partial D} = 3I_m^2 \frac{\partial L_л}{\partial D} = 3I_m^2 \frac{x_л}{\omega D}; \quad I_m = \frac{U\sqrt{2}}{x_d''}.$$

Подставляя в (144), получим

$$F = \frac{6U^2}{(x''_{d(ом)})^2} \frac{x_{л(ом)}}{\omega D 2\pi}\ дж/см \quad \text{или} \quad F = \frac{10 P_N x_л}{\tau\omega D (x_d'')^2}\ кг, \tag{145}$$

где $x_л$ и $x_d''$ — относительные реактивности и $P_N = 3U_N I_N$ *вт*.



Общее сечение кольца

$$S_к = \frac{F}{\sigma_к n_к},$$

где $\sigma_к$ — допустимое напряжение кольца на разрыв;

$n_к$ — число колец на две лобовые части.

Обыкновенно берут немагнитную сталь $S_к = 2{,}5 \times 2{,}5 = 6{,}25$ *см²* или $2{,}2 \times 2{,}2 = 4{,}8$ *см²*; $\sigma_{к.доп} = 2000$ *кг/см²* или латунь $S_к = 3{,}2 \times 3{,}2 = 10{,}2$ *см²*; $\sigma_{к.доп} = 1500$ *кг/см²*.

5. Расчет станин на вибрацию по [130]. Частота собственных колебаний станины, рассматриваемой как кольцо, закрепленное в точках $B$ и $B'$ (рис. 126),

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = C\sqrt{\frac{EI}{G_{ст}R_н^3} g}\ \frac{1}{сек}, \tag{146}$$

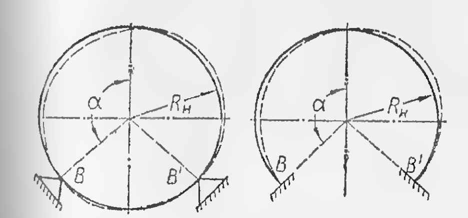



Рис. 126. К анализу колебаний станины.

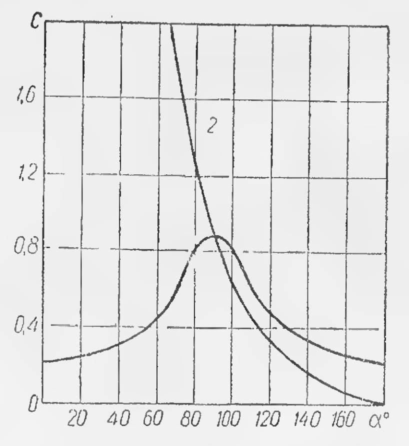



Рис. 127. Кривые $C = f(\alpha)$:
*1* — полное кольцо; *2* — неполное кольцо (защемленные опоры).

где $I$ — момент инерции сечения станины относительно нейтральной оси, *см⁴*;

$G_{ст}$ — вес станины, *кг*;

$R_н$ — радиус по нейтральной оси сечения станины, *см*;

$C$ — постоянная, зависящая от угла закрепления $\alpha$ (рис. 126);

$g = 981$ *см/сек²*.

Частота свободных колебаний станины как неполного кольца, закрепленного в точках $B$ и $B'$, может быть подсчитана по (146) при соответствующих значениях $C$ (рис. 127).

Желательно, чтобы частота свободных колебаний лежала выше или ниже основных частот вынуждающих колебаний, т. е. частоты вращения и удвоенной частоты переменного тока.

Для станин машин постоянного тока частоту свободных колебаний следует рассчитывать с учетом массы полюсов и податливости полюсных болтов [136].

## 8-7. РАСЧЕТ ВАЛОВ

1. Типы валов и характер их нагрузок.

*Тип 1.* Валы вертикальных машин испытывают напряжения от собственного веса, а также от передаваемого вращающего момента,

и несут сосредоточенную нагрузку от одностороннего магнитного притяжения полюсов ротора к статору. Эпюра моментов показана на рис. 128. Вал имеет почти цилиндрическую форму.

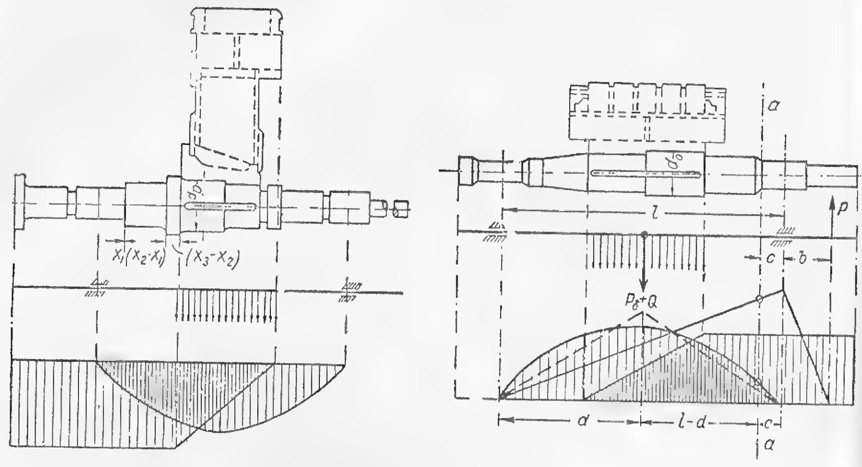



Рис. 128. Эпюры моментов на валу синхронной явнополюсной машины.

Рис. 129. Расчет вала на комбинированное напряжение.

*Тип 2.* Валы горизонтальных машин с сосредоточенной нагрузкой от веса ротора и магнитного притяжения (рис. 129) испытывают в отдельных случаях также напряжения от момента, приложенного к свободному концу вала (ремень, зубчатая передача и т. д.). Эпюры моментов приведены на рис. 129. Вал часто имеет сигарообразную форму (рис. 130).

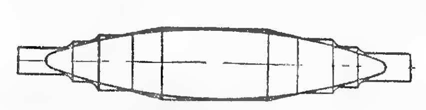


Рис. 130. Сигарообразная форма вала.

*Тип 3.* Валы горизонтальных быстроходных машин, составляющие одно целое с ротором (рис. 131), нагружены распределенной нагрузкой от собственного веса и передаваемым моментом кручения. Эпюры моментов представлены на рис. 131. Вал имеет цилиндрическую часть (бочку) и хвостовые части переменного сечения.

Предварительное определение максимального диаметра вала $d_0$ и диаметра $d_ц$ (приложение XI):

а) во всех случаях прогиб вала должен быть для синхронных машин и машин постоянного тока обычно не больше 5% от воздушного зазора $\delta$, для асинхронных машин — не больше 10%;

б) критическая скорость должна быть в большинстве случаев выше номинальной на 25—30%. Для валов типа 3, имеющих большую длину и высокую рабочую скорость, критическая скорость (первая, а иногда и вторая) часто лежит ниже рабочей или номинальной. В регулируемых машинах критическая скорость должна лежать на 25—30% выше верхнего предела скорости;



в) напряжения изгиба и кручения должны быть в пределах, допустимых при максимально возможных моментах кручения и изгиба. Обычно $M_{кр} = kM_N$, где $k = 2 \div 2{,}5$. Точное определение $k$ для разных случаев см. в приложении X. В отдельных случаях кратность момента кручения может быть выше.

В предварительных расчетах диаметр цапфы определяется только по крутящему моменту, т. е. по формуле

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi d_ц^3} M_{кр}, \qquad (147)$$

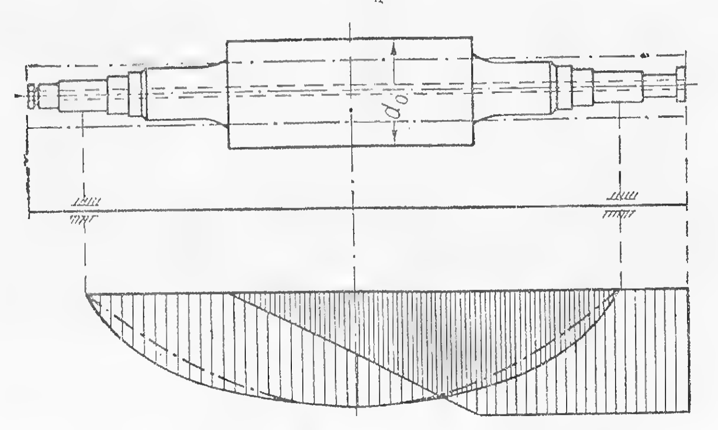



Рис. 131. Эпюра моментов на валу турбогенератора.

а затем проверяется по формуле сложного напряжения или максимального касательного напряжения

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi d_ц^3} \sqrt{M_{изг}^2 + M_{кр}^2}. \qquad (148)$$

Таким образом,

$$d_{min} > \sqrt[3]{\frac{kM_N \cdot 16}{\pi \tau_{max}}}\,^{*}. \qquad (149)$$

Более точный расчет напряжений см. в примере 2 гл. 10.

Так как в формулах механических расчетов везде момент будет выражен в *кгсм*, то

$$M_N = \frac{P_N \cdot 100}{\omega_N \cdot 9{,}81} = 1{,}62 \frac{P_N}{n_N}, \qquad (150)$$

при этом $n$, об/сек, и $P_N$, *вт*.

Если $P_N$ выражено в *квт* и $n$ в об/мин, то

$$M_N = 97\,500 \frac{1}{n_N} P_N \text{ кгсм}. \qquad (151)$$

* $d_{min} = d_ц$ проверяется дальше на удельное давление на подшипник и толщину масляной пленки.

Максимальный диаметр $d_0$ (рис. 129) в типах валов 1 и 2 выбирается на $20 \div 50\%$ больше $d_{\min}$, после чего проверяется на прогиб и критическую скорость.

2. Прогиб вала. Определение прогиба вала преследует двоякую задачу: а) установить допустимую величину прогиба с учетом эксцентриситета и вибрации, а также по условиям устранения возможности задевания ротора за статор в машинах с малым зазором (прогиб в этих машинах не должен превышать 10% от величины зазора); б) определить критические скорости вала. В первом случае учитываются все силы, действующие на вал (масса вала, массы, насаженные на вал, одностороннее магнитное притяжение, натяжение ремня и пр.). При определении прогиба с целью установления критической скорости учитываются только силы от веса вала и маховых масс, насаженных на вал. Это обстоятельство иногда не отмечается, что приводит к ошибочным выводам.

В простейших случаях прогиб определяется по нижеследующим формулам:

Для вала цилиндрической формы с сосредоточенной нагрузкой максимальный прогиб достаточно точно определяется по формуле для балки, нагруженной посредине силой $P$ [125],

$$f = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{P}{k}, \tag{152}$$

где $l$ — расстояние между опорами;

$E$ — модуль упругости (для стали $E = 2 \cdot 10^6$ *кг/см²*);

$I$ — экваториальный момент инерции вала: для сплошного вала диаметром $d$

$$I = \frac{\pi d^4}{64},$$

для полого вала

$$I = \frac{\pi (d^4 - d^4_{\text{отв}})}{64};$$

$k$ — жесткость вала на изгиб, равная сосредоточенной нагрузке, приложенной посредине и отнесенной к единице прогиба,

$$k = \frac{48EI}{l^3}. \tag{152a}$$

Для вала диаметром $d$ и длиной $l$, несущего распределенную нагрузку,

$$f = \frac{5}{384}\frac{ql^4}{EI} = \frac{5}{384}\frac{Ql^3}{EI} = \frac{Q}{k}, \tag{153}$$

где $q$ — нагрузка в *кг* на 1 *см* длины вала и

$$k = \frac{384EI}{5l^3}. \tag{153a}$$

Только для случая вала типа 1 можно применять формулу (152). Обыкновенно сечение валов переменное, следовательно, и переменная жесткость $EI$, и нагрузка на вал является при этом частично распределенной. Для вала типа 2 можно еще определить прогиб по формуле (152), подставляя эквивалентный момент инерции, равный $(0{,}6 \div 0{,}8)\, I_0$, где $I_0$ — момент инерции посредине вала, то есть

$$f = (1{,}25 \div 1{,}6)\frac{Ql^3}{48EI_0}. \tag{154}$$

Точное значение $I_{\text{экв}}$ можно найти из равенства прогибов по теореме Кастильяно.

При изгибе симметричного вала одной силой $P$ в центре изгибающий момент без учета массы вала

$$M = \frac{P}{2}x,$$

потенциальная энергия

$$U = \int_0^{l/2} \frac{M^2 dx}{2EI_x},$$

прогиб

$$f = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{P}{2E}\int_0^{l/2} \frac{x^2\, dx}{I_x}. \tag{155}$$

Приравнивая прогиб, определенный по формуле (155), прогибу по (152) при $I = I_{\text{экв}}$, получим

$$\frac{Pl^3}{48EI_{\text{экв}}} = \frac{P}{2E}\int_0^{l/2} \frac{x^2\, dx}{I_x}. \tag{155a}$$

Пусть на участке $x_1$ момент инерции $I_1$, на участке $x_2$ момент инерции $I_2$ и т. д. до участка $x = \frac{1}{2}l$, где момент инерции $I_0$ (рис. 128). Тогда из (155a)

$$\frac{1}{I_{\text{экв}}} = \frac{1}{I_0}\left[\frac{\boldsymbol{x}_1^3}{j_1} + \frac{\boldsymbol{x}_2^3 - \boldsymbol{x}_1^3}{j_2} + \frac{\boldsymbol{x}_3^3 - \boldsymbol{x}_2^3}{j_3} + \ldots + \boldsymbol{x}_k^3\right] = \frac{1}{I_0}S_1, \tag{156}$$

где $\boldsymbol{x}_1 = \frac{x_1}{0{,}5l}$, $\boldsymbol{x}_2 = \frac{x^2}{0{,}5l}$ и т. д. — относительные значения длин участков вала;

$j_1 = \frac{I_1}{I_0} = \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^4$; $j_2 = \frac{I_2}{I_0} = \left(\frac{d_2}{d_0}\right)^4$ и т. д. — относительные моменты инерции. Для ротора турбогенератора $I_0$ по стр. 837.

При $j_1 = j_2 = 1$ сумма $S_1$ равна единице.

В общем случае жесткость и вес вала на единицу длины перемены (рис. 129, 130). При этом прогиб обычно определяют графическим методом. Вал неравномерного сечения приводит к валу равномерного сечения, нагруженному распределенной нагрузкой, соответствующей диаграмме изгибающих моментов. Этот метод требует тщательных графических построений веревочных многоугольников и поэтому связан с погрешностью и значительной затратой времени. Укажем здесь простой способ определения прогиба в любой точке и максимального прогиба для вала типа 3, то есть для ротора турбогенератора (рис. 132).

Сначала определяем реакции опор. Для левой опоры

$$R_1 = \frac{G}{l} x_B,$$

для правой

$$R_2 = \frac{G}{l} x_A,$$

где $G$ — вес ротора;
$l$ — расстояние между опорами;
$x_A$ — расстояние от центра тяжести до левой опоры;

$$x_B = l - x_A.$$

Если, начиная от сечения $x$ по направлению к левой опоре, имеются участки ротора 1, 2, ..., $n$ и координаты центров тяжести их, отсчитываемые от $x$ к левой опоре, равны $x_1, x_2, \ldots, x_n$, то диаграмма изгибающих моментов в пределах от $x = 0$ до $x = l$ может быть построена по уравнению

$$M = R_1 x - (Q_1 x_1 + Q_2 x_2 + \ldots + Q_n x_n) = M(x). \qquad (157)$$

Построив диаграмму $M = f(x)$, разделим в местах изменения сечения ординаты $M(x)$ на отношения экваториальных моментов инерции сечений $\frac{I_1}{I_0}$, $\frac{I_2}{I_0}$, ... и т. д., где $I_0$ — момент инерции центральной части. При этом получим диаграмму приведенных изгибающих моментов (рис. 132).

Согласно [125], рассматривая эту диаграмму как нагрузку, получим реакции опор от нее: для левой

$$R_1' = \frac{S}{l} x_B',$$

для правой

$$R_2' = \frac{S}{l} x_A',$$

где $S$ — площадь приведенной диаграммы моментов, *кгсм²*;
$x_A'$ — расстояние центра тяжести площади диаграммы до левой опоры;

$$x_B' = l - x_A'.$$

Прогиб в любом сечении на расстоянии $x$ от левой опоры

$$y = \frac{1}{EI_0} [R_1' x - (S_1 x_{1c} + S_2 x_{2c} + \ldots + S_n x_{nc})] \text{ см}, \qquad (158)$$

где $S_1, S_2, \ldots, S_n$ — элементы площади $S$;
$x_{1c}, x_{2c}, \ldots, x_{nc}$ — координаты центров тяжести этих элементов, отсчитываемые от рассматриваемого сечения $x$.

Прогиб в центре тяжести ротора является определяющим при нахождении критической скорости. По формуле (158)

$$y_A = \frac{1}{EI_0} [R_1' x_A - (S_{1A} x_{1cA} + S_2 x_{2cA} + \ldots + S_n x_{ncA})], \qquad (159)$$

где $S_{1A}$ — элемент площади ($abcd$), заключенный между сечением $x = x_A$ и ближайшим сечением по направлению к левой опоре, соответствующем новому диаметру;



$x_{1cA}, x_{2cA}, x_{3cA}$ и т. д. — координаты центров тяжести сечений $S_{1A}, S_{2A}, S_{3A}, \ldots$, отсчитываемых от $x = x_A$.

Прогиб при $x = l/2$, то есть посредине, получится при подстановке в (158) $x = \frac{l}{2}$.

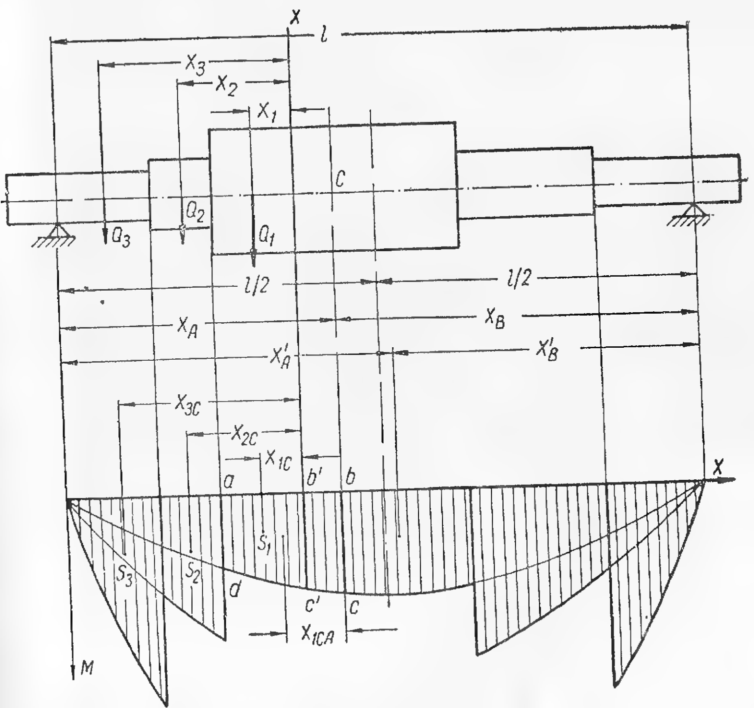



Рис. 132. Построение диаграммы приведенных моментов для вала типа 3.

Для симметричного ротора $\left(x_A = x_B = x_A' = x_B' = \frac{l}{2}\right)$ достаточно рассмотреть только половину диаграммы $\left(\frac{S}{2}\right)$. При этом прогиб под центром тяжести совпадает с максимальным прогибом и по (158)

$$y_{max} = f = \frac{1}{EI_0} \left[\frac{S}{2}\frac{l}{2} - (S_1 x_{1c} + S_2 x_{2c} + \ldots + S_n x_{nc})\right]. \qquad (160)$$

Так как $\frac{S}{2} = S_1 + S_2 + \ldots + S_n$, то, вводя координати $x_{1c}' = \frac{l}{2} - x_{1c}$ и $x_{2c}' = \frac{l}{2} - x_{2c}$ (рис. 132), из (160) получим

$$y_{max} = f = \frac{1}{EI_0} (S_1 x_{1c}' + S_2 x_{2c}' + \ldots + S_n x_{2n}'), \qquad (161)$$

то есть максимальный прогиб симметричного вала определяется как сумма моментов площадей $S_1, S_2, \ldots, S_n$ приведенной диаграммы относительно левой опоры, поделенная на $EI_0$.

Как легко убедиться, приведенный способ отличается простотой и точностью. Число графических построений минимально. Площади $S_1, S_2, \ldots, S_n$ могут быть определены также аналитически (без подсчета площадей по клеткам). Пример расчета по данному способу приведен в гл. 12.

Этот способ может быть распространен и на случай, когда на валу переменного сечения имеются маховые массы, вес которых

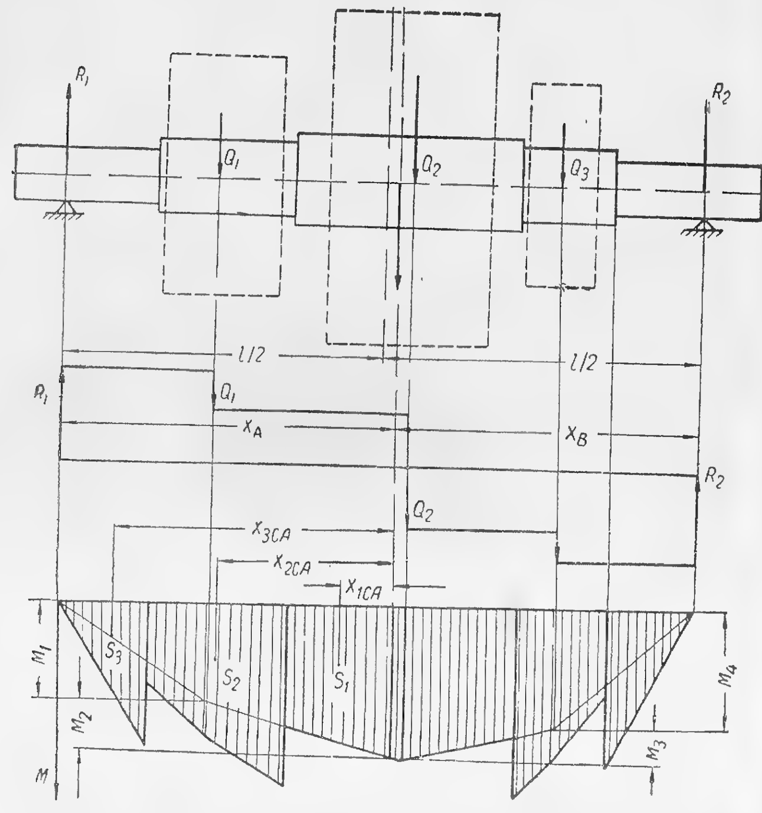



Рис. 133. Построение диаграммы перерезывающих сил и приведенных моментов для вала типа 2.

$Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$. В этом случае обычно массой вала можно пренебречь и учитывать только его жесткость на изгиб. Определив реакции опор, строим эпюру перерезывающих сил и по ней диаграмму моментов, определяя ординаты $F_1, F_2, \ldots, F_n$ аналитически как произведения сил $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ на отрезки $x_1, x_2, \ldots, x_n$ (рис. 133).

Для получения приведенной диаграммы моментов в местах изменения сечений умножаем ординаты $M(x)$ на отношение $\frac{I_0}{I_x}$. Прогиб определяем аналогично вышеизложенному по (158).



Указанный способ расчета, как показано ниже, можно применить и для расчета прогибов вала на трех и более опорах, а также для расчета критических скоростей второго и более высоких порядков (гл. 12).

Аналитические методы расчета прогиба можно получить, пользуясь вышеизложенной методикой или теоремой Кастильяно. По теореме Кастильяно максимальный прогиб

$$f = \frac{\partial U}{\partial P}, \tag{162}$$

где для симметричного вала $U = 2\int_0^{l/2} \frac{M^2 dx}{2EI}$ — потенциальная энергия изогнутого вала;

$P$ — условная сила, приложенная в точке $x = \frac{1}{2} l$.

Изгибающий момент для симметричного вала

$$M = \frac{1}{2} Qx + \frac{1}{2} Px - x_c(x) \int_0^x q(x)\, dx; \tag{163}$$

Здесь $Q$ — вес ротора;

$q(x)$ — вес ротора на единицу длины;

$x_c(x) = \dfrac{\int_0^x q(x)\, x\, dx}{\int_0^x q(x)\, dx}$ — координата центра тяжести (рис. 132), отсчитываемая от сечения $x$ влево.

Из (162) получаем

$$f = \frac{2}{E}\int_0^{l/2} \frac{M^*}{I(x)} \frac{\partial M}{\partial P} dx = \frac{2}{E}\int_0^{l/2} \frac{1}{I(x)}\left[\frac{Q}{2}x - \int_0^x q(x)\, x\, dx\right]\frac{1}{2} x\, dx =$$

$$= \frac{1}{2E}\left\{Q\left[\int_0^{x_1}\frac{x^2 dx}{I_1} + \int_{x_1}^{x_2}\frac{x^2\, dx}{I_2} + \ldots + \int_{x_k}^{l/2}\frac{x^2\, dx}{I_0}\right] - \right.$$

$$\left. - \left[\int_0^{x_1}\frac{q_1 x^3}{I_1} dx + \int_{x_1}^{x_2}\frac{q_2 x^3}{I_2} dx + \ldots + \int_{x_k}^{l/2}\frac{q_0 x^3}{I_0} dx\right]\right\} \tag{164}$$

или

$$f = \frac{1}{2E}[QS_1 - S_2], \tag{165}$$

где

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{3}\left[\frac{x_1^3}{I_1} + \frac{x_2^3 - x_1^3}{I_2} + \ldots + \frac{\left(\frac{1}{2}l\right)^3 - x_k^3}{I_0}\right] \\ S_2 &= \frac{1}{4}\left[\frac{q_1 x_1^4}{I_1} + \frac{q_2(x_2^4 - x_1^4)}{I_2} + \ldots + \frac{q_0[(0{,}5\, l)^4 - x_k^4]}{I_0}\right] \end{aligned}\right\}. \tag{166}$$

---

* Величина $M$ должна быть взята при $P = 0$.

Сравнивая результаты по (158) и (165), видим их полное соответствие. Вводя, как и выше в (156), относительные величины, получим

$$f = \frac{Ql^3}{48EI_0}\left[S_1 - \frac{3}{8} S_2 \frac{Q_0}{Q}\right], \qquad (167)$$

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= \frac{x_1^3}{j_1} + \frac{x_2^3 - x_1^3}{j_2} + \ldots + 1 - x_k^3 \\ S_2 &= q_1 \frac{x_1^4}{j_1} + q_2 \frac{x_2^4 - x_1^4}{j_2} + (1 + x_k^4) \end{aligned}\right\}, \qquad (168)$$

где $q_1 = \frac{Q_1}{Q'_0} = \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2$; $q_2 = \left(\frac{d_2}{d_0}\right)^2$ и т. д., т. е. отношения веса на единицу длины данного участка к весу на единицу длины центральной части;

$Q_0 = Q'_0 l$ — вес ротора при постоянном диаметре, равном диаметру центральной части.

Отношение

$$\frac{Q}{Q_0} = x_1 q_1 + (x_2 - x_1) q_2 + \ldots + (x_k - x_{k-1}) q_k + 1 - x_k. \qquad (169)$$

При $j_1 = j_2 = 1$, $S_{10} = 1$, $S_{20} = 1$ и $\frac{Q_0}{Q} = 1$ получим прогиб для вала равного сечения

$$f = \frac{5}{384} \frac{Ql^3}{EI}. \qquad (170)$$

Таким образом, и в этом случае можно вычислить эквивалентный момент инерции

$$\frac{1}{I_{экв}} = \frac{1}{I_0}\left(S_{10} - \frac{3}{8} S_{20} \frac{Q_0}{Q}\right)$$

и прогиб

$$f = \frac{Ql^3}{48EI_{экв}}. \qquad (171)$$

Суммы $S_{10}$ и $S_{20}$ практически вычисляются весьма быстро. Сумма $S_{20}$ учитывает распределенность веса ротора. Так, например, для ротора, представленного на рис. 131, получим

$$x_1 = 0{,}1; \quad x_2 = 0{,}185; \quad x_3 = x_k = 0{,}555;$$

$$j_1 = \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^4 = (0{,}238)^4; \quad j_2 = (0{,}395)^4; \quad j_3 = j_k = (0{,}5)^4;$$

$$S_1 = \frac{(0{,}1)^3}{(0{,}238)^4} + \frac{(0{,}185)^3 - 0{,}1^3}{(0{,}395)^4} + \frac{0{,}555^3 - 0{,}185^3}{0{,}5^4} + 1 - 0{,}555^3 =$$

$$= 0{,}322 + 0{,}22 + 2{,}66 + 1 - 0{,}173 = 4{,}029;$$

$$\frac{Q}{Q_0} = 0{,}1 \cdot 0{,}238^2 + 0{,}085 \cdot 0{,}395^2 + 0{,}55 \cdot 0{,}5^2 + 1 - 0{,}555 = 0{,}615;$$

$$\frac{Q_0}{Q} S_2 = \left\{\left(\frac{0{,}1}{0{,}238}\right)^4 \cdot 0{,}238^2 + \left[\left(\frac{0{,}185}{0{,}395}\right)^4 - \left(\frac{0{,}1}{0{,}395}\right)^4\right] 0{,}395^2 +\right.$$

$$\left. + \left[\left(\frac{0{,}555}{0{,}5}\right)^4 - \left(\frac{0{,}185}{0{,}5}\right)^4\right] 0{,}5^2 + 1 - (0{,}555)^4\right\} \frac{1}{0{,}615} = 2{,}08.$$

Таким образом,

$$f = \frac{Ql^3}{48EI_0}\left[4{,}029 - \frac{3}{8} 2{,}08\right] = 3{,}25 \frac{Ql^3}{48EI_0} = 3{,}25 f'.$$



Без учета распределения веса [1] $f = 4{,}029 f'$, то есть погрешность составляет

$$\frac{4{,}029 - 3{,}25}{3{,}25} \cdot 100 = 24\%.$$

Так как эти роторы иногда работают при скоростях, близких к критической, то такая погрешность в расчете, конечно, не допустима

Если вал нагружен и силой $P$ (рис. 129) на свободном конце, то к прогибу, вычисленному по (171) надо прибавить прогиб от действия момента пары $M_0 = Pb$. Дополнительная реакция опор от этого момента $R = \frac{M_0}{l} = P\frac{b}{l}$. При этом дополнительный прогиб $f_P$ может быть найден аналогично рассмотренному выше случаю

$$f_P = \frac{P_c b l^2}{16EI_0} S_0, \qquad (172)$$

где

$$S_0 = \frac{x_1^2}{j_1} + \frac{x_2^2 - x_1^2}{j_2} + \ldots + \frac{x_k^2 - x_{k-1}^2}{j_k} + 1 - x_k^2. \qquad (173)$$

При вычислении прогибов в ряде случаев надо учесть влияние на прогиб магнитного притяжения [43].

**Сила одностороннего магнитного притяжения $P_{\delta_0}$ и максимальный прогиб.** По данным [1], «начальнсе значение» силы

$$P_{\delta_0} = k_0 e_0, \qquad (174)$$

где

$$k_0 = \frac{63}{\delta}\left(\frac{B_\delta}{1000}\right)^2 \cdot D \cdot l \cdot 10^{-3} \ кг/см, \qquad (175)$$

$e_0$ — начальный эксцентриситет вала, $\delta$ — зазор, *см*.

Максимальнсе значение $k_0$ принимают равным

$$k_{0\,max} \approx (4 \div 4{,}5) \frac{Dl}{\delta} \ кг/см, \qquad (176)$$

где $D$ и $l$ — диаметр и длина ротора.

Под влиянием этой силы прогиб вала возрастает на величину

$$f' = \frac{P_{\delta_0}}{k} = f_Q \frac{P_{\delta_0}}{Q}, \qquad (177)$$

где $f_Q$ — прогиб от веса ротора $Q$;

$k$ — жесткость вала

$$k = \frac{48 I_{экв}}{l^3}.$$

Вследствие увеличения прогиба магнитнсе притяжение возрастает на величину

$$P'_\delta = P_{\delta 0} \frac{f'}{e_0}. \qquad (178)$$

Новое увеличение силы $P'_\delta$ вызовет дополнительный прогиб

$$f'' = \frac{P'_\delta}{k} = \frac{f'}{e_0} \cdot f' \text{ и т. д.}$$

Полный установившийся дополнительный прогиб от магнитного притяжения в пределе будет равен

$$f_\delta = f' + f'' + f''' + \ldots = \frac{e_0}{e_0 - f'} f' = \frac{e_0 k_0}{k - k_0} = \frac{P_{\delta_0}}{k - k_0}. \qquad (179)$$

Величину $f_\delta$ возможно определить также непосредственно из равенства сил упругости $kf_\delta$ и внешних сил

$$kf_\delta = P_{\delta_0} + k_0 f_\delta, \quad \text{откуда} \quad f_\delta = \frac{P_{\delta_0}}{k - k_0}.$$

Начальный эксцентриситет $e_0$ полагается равным сумме износа подшипников и неточности сборки (табл. 20), прогиба от веса ротора по (152)—(153) или (171) и прогиба от силы $P_c$ на свободном конце (если таковая имеется) $f_P$, см. (172), т. е.

$$e_0 = \varepsilon + f_Q + f_P. \qquad (179a)$$

Суммарный прогиб вала

$$f = f_\delta + f_Q + f_P. \qquad (180)$$

*Таблица 20*

**Практические величины износа подшипников и неточности сборки**

| Величины (в *мм*) | Подшипники скольжения | | | Подшипники качения | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Диаметры шейки вала | 41—86 | 81—120 | 121—180 | 41—80 | 81—120 | 121—180 |
| Предельный износ подшипников | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,22 | 0,25 |
| Неточность обработки и сборки | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| Смещение $\varepsilon$ центра вала | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,25 | 0,3 | 0,32 |

3. Критические скорости вращения валов. Горизонтальные валы, лежащие на опорах, а также вертикальные валы, подвешенные или опертые на подпятник, представляют собой упругую систему, способную к колебаниям. Колебания могут происходить в поперечном к оси направлении (поперечные колебания), в продольном и тангенциальном направлениях (продольные и крутильные).

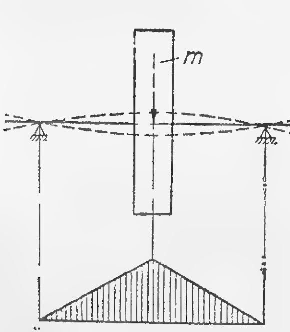


Рис. 134. Эпюра моментов для вала с сосредоточенной посредине нагрузкой.

Поперечные колебания, когда масса вала мала по сравнению с массой ротора. Отклонение оси вала от положения равновесия вызывает упругую силу, стремящуюся вернуть вал в исходное положение. Представим себе массу $m$ посредине вала (рис. 134), и пусть эта масса будет намного больше массы вала. Если масса движется в направлении $y$, то при свободных колебаниях силы инерции уравновешиваются упругими силами и силами трения

$$m\frac{d^2y}{dt^2} + \Delta\frac{dy}{dt} + ky = 0, \qquad (181)$$



где $y$ — прогиб вала в месте нахождения массы $m$.

Решение (181), как известно, имеет вид

$$y = Ce^{-\frac{\alpha}{2}t}\sin(\omega_{св}t + \varphi), \qquad (182)$$

где $\omega_{св} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{\Delta}{2m}\right)^2}$ — угловая частота свободных колебаний;

$k$ — жесткость вала по (152а) или (176);

$\alpha = \frac{\Delta}{m}$.

Если на массу $m$ действует какая-либо периодическая вынуждающая сила частоты $\omega$, то при $\omega = \omega_{св}$ наступает резонанс, и прогиб может возрасти до опасной величины, т. е. привести к поломке вала.

Как известно, отношение динамического прогиба к статическому, вычисленному по (152), (171) и (180), равно

$$\beta = \frac{f_{дин}}{f_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\alpha\omega}{\omega_0^2}\right)^2}}, \qquad (183)$$

где $\alpha$ — декремент затухания; $\omega_0 = \sqrt{k/m} \approx \omega_{св}$.

При малых затуханиях

$$\beta \approx \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}, \qquad (184)$$

т. е. при резонансе прогиб стремится к бесконечности.

Рис. 135. К определению критической скорости.

Понятие критической (резонансной) скорости следует и из такого рассуждения.

Пусть (рис. 135) $O$ — центр вращения, $c$ — центр обточки и $G$ — центр тяжести. Тогда при вращении центра массы $m$ центробежная сила ее будет равна $m\omega^2(y + e)$, где $y + e$ — расстояние центра тяжести от центра вращения. Эта сила уравновешивается силой упругости $ky$, т. е.

$$m\omega^2(y + e) = ky,$$

откуда прогиб

$$y = \frac{\omega^2 e}{\frac{k}{m} - \omega^2} = \frac{\omega^2 e}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

и может возрасти при данных допущениях до $\infty$, если $\omega_0 = \omega$.

Таким образом, первая критическая скорость

$$\omega_{кр} = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{k}{Q}g} \qquad (185)$$

или, так как согласно (153)

$$\frac{Q}{k} = f_Q,$$

$$\left.\begin{aligned} \omega_{кр} &= \sqrt{\frac{g}{f_Q}} \ \frac{1}{сек} \\ n_{кр} &= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{f_Q}} \ об/сек \end{aligned}\right\} \quad (186)$$

или

$$n_{кр} = 300\sqrt{\frac{1}{f_Q}} \ об/мин, \quad (187)$$

где $f_Q$ — статический прогиб от веса вала и ротора, *см*.

Исследования показывают, что, кроме первой критической скорости, имеется ряд высших. Для идеального вала, опертого на концах, эти скорости относятся как квадраты целых чисел, т. е.

$$n_2 = (2)^2 n_1; \quad n_3 = (3)^2 n_1; \quad n_k = (k)^2 n_1.$$

Для действительных валов критические скорости второго и высших порядков отличаются от $4n_{1кр}$, $9n_{1кр}$ и т. д. и, кроме того, появляются критические скорости «низших» порядков [51], [75], [131]. Так, роторы двухполюсных турбогенераторов вследствие переменной жесткости по взаимно перпендикулярным осям большого и малых зубьев имеют низшую критическую скорость, близкую к $\frac{1}{2}n_{1кр}$. Вторая, третья и т. д. критические скорости могут быть приближенно найдены путем определения статических прогибов реального вала при изгибе по второму, третьему и т. д. виду упругой линии вала, т. е. в соответствии с (185), (210) и (213)

$$n_{2кр} = n_{1кр}\sqrt{\frac{k_{A2}}{k_{A1}}\frac{m_{A1}}{m_{A2}}}; \quad n_{3кр} = n_{1кр}\sqrt{\frac{k_{A3}}{k_{A1}}\frac{m_{A1}}{m_{A3}}} \ и \ т. \ д.,$$

где $k_{A2}$, $k_{A3}$ — жесткости при изгибах вала по 2-му и 3-му виду соответственно;

$m_{A2}$, $m_{A3}$ — колеблющиеся эквивалентные массы по 2-му и 3-му виду колебаний.

Для турбогенераторов вторая критическая скорость находится в пределах $3 \div 3{,}5 \ n_{1кр}$.

Определение второй критической скорости дано ниже, а также в гл. 12.

Когда масса вала велика (случай цельнокованого ротора), критические скорости поперечных колебаний при *постоянном сечении* вала, согласно [125], можно определить из уравнения изгиба балки

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}; \quad q = -\frac{dF}{dx} = -\frac{d^2M}{dx^2}, \quad (188)$$

где $y$ — прогиб;
$F$ — перерезывающая сила;
$M$ — изгибающий момент;
$q$ — удельная нагрузка.



Дифференциальное уравнение изгиба балки при переменной нагрузке

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) = q(x). \quad (189)$$

Примем сначала постоянную жесткость $EI = \text{const}$. Пусть вращение вала происходит со скоростью $\omega$, тогда статическая нагрузка должна быть заменена его центробежной силой

$$\frac{q}{EIg}\omega^2 y,$$

и мы получим

$$\frac{d^4y}{dx^4} = \frac{q\omega^2}{gEI}y. \quad (190)$$

Решение этого уравнения

$$y = \sum_{i=1}^{4} A_i e^{\lambda_i x}, \quad (191)$$

где $\lambda_i$ — четыре корня характеристического уравнения

$$\lambda^4 - b^4 = 0; \quad b^4 = \frac{q\omega^2}{gEI} \quad (192)$$

или в вещественной форме

$$y = A\,\text{ch}\,\lambda x + B\,\text{sh}\,\lambda x + C\cos\lambda x + D\sin\lambda x. \quad (193)$$

Для балки на двух опорах при $x = 0$ и $x = l$ имеем $y = 0$ и $\frac{d^2y}{dx^2} = 0$, откуда следует, что $A = C = 0$.

Из остальных условий вытекает, что

$$\begin{aligned} B\,\text{sh}\,\lambda l + D\sin\lambda l &= 0, \\ B\,\text{sh}\,\lambda l - D\sin\lambda l &= 0, \end{aligned} \quad (194)$$

откуда $\text{sh}\,\lambda l \sin\lambda l = 0$. Последнее может быть только при $\lambda l = k\pi$, где $k$ — целое число. Получаем бесконечное число возможных колебаний вида

$$y_k = D_k \sin\frac{k\pi x}{l}. \quad (195)$$

Согласно (192)

$$\lambda^4 = \left(\frac{k\pi}{l}\right)^4 = \frac{q\omega^2}{EIg},$$

и, следовательно, угловая частота порядка $k$ будет

$$\omega_k = \frac{k^2\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{gEI}{q}}; \quad k = 1, 2, 3, \ldots \quad (196)$$

При всех скоростях вращения, соответствующих (196), вал будет в состоянии резонанса.

Первая критическая скорость

$$\omega_{1кр} = \frac{\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{gEI}{q}}. \quad (197)$$

Сравнивая (197) с выражением (185) и (186) и подставляя для балки равного сечения

$$f_Q = \frac{5}{384}\frac{ql^4}{EI},$$

находим

$$\omega_{1кр} = \frac{8{,}8}{l^2}\sqrt{\frac{gEI}{q}}, \quad (198)$$

то есть получаем величину, меньшую в отношении $\frac{8{,}8}{\pi^2} = 0{,}9$ или меньшую на 10%.

Критические скорости при переменном сечении ротора типа 3. Общие уравнения статического изгиба силами собственного веса

$$\left.\begin{aligned}\frac{d^2M}{dx^2} &= -q(x)\\ \frac{d^2y}{dx^2} &= -\frac{M(x)}{EI(x)}\end{aligned}\right\}, \qquad (199)$$

где $q(x)$ — вес ротора переменного сечения на единицу длины;
$M(x)$ — изгибающий момент;
$I(x)$ — переменный момент инерции сечения.

Уравнения движения при колебаниях согласно принципу Д'Аламбера получаются заменой статической нагрузки $q(x)$ силами инерции $-\frac{q(x)}{g}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$, а именно:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial^2M}{\partial x^2} &= \frac{q(x)}{g}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\\ \frac{\partial^2y}{\partial x^2} &= -\frac{M(x,\ t)}{EI(x)}\end{aligned}\right\}. \qquad (200)$$

Здесь $M$ и $y$ являются функциями расстояния $x$ и времени $t$. При установившихся синусоидальных колебаниях динамический прогиб $y(x,\ t)$ и динамический момент $M(x,\ t)$ представляются в виде

$$\left.\begin{aligned}y(x,\ t) &= y(x)\sin\omega_\nu t\\ M(x,\ t) &= M(x)\sin\omega_\nu t\end{aligned}\right\}, \qquad (201)$$

где $y(x)$ и $M(x)$ являются функциями только $x$ и представляют форму колебаний. Подставляя (201) в (200), получим

$$\left.\begin{aligned}\frac{d^2M(x)}{dx^2} &= -\omega_\nu^2\frac{q(x)}{g}\\ \frac{d^2y}{dx^2} &= -\frac{M(x)}{EI(x)}\end{aligned}\right\}. \qquad (202)$$

При граничных условиях

$$y(0) = y(l) = 0;$$
$$M(0) = M(l) = 0.$$

Система уравнений (202) при $q(x) = \text{const}$ и $I(x) = \text{const}$ была решена выше. Путем дифференцирования второго уравнения и подстановки в первое получалось одно уравнение (190), решение которого давало частоты в виде (196).

Согласно [131] систему (202) можно решить, если представить $y(x)$ и $M(x)$ в виде бесконечных рядов

$$\left.\begin{aligned}y(x) &= \sum_i a_i\sin\frac{i\pi x}{l}\\ M(x) &= \sum_i b_i\sin\frac{i\pi x}{l}\end{aligned}\right\}. \qquad (203)$$

Результаты расчета и проверка графическими методами показывают, что метод [131] является, по-видимому, достаточно точным для первой критической скорости. Что касается высших критических скоростей, то здесь необходима соответствующая проверка, так как для высших порядков $M(x)$ сильно отличается от синусоидального представления и для повышения точности пришлось бы учитывать большее число членов ряда гармонических функций.

Решить систему (202) можно, используя энергетический метод и кривые $M(x)$ для различных типов колебаний, построенных графически с учетом переменной жесткости вала.



Первая критическая скорость соответствует изгибу ротора по 1-й форме. Потенциальная энергия изогнутого вала при этом

$$U = \frac{1}{2EI_0}\int_0^l\frac{M_1^2(x)}{I_x/I_0}\,dx = \frac{1}{2}\int_0^l q(x)\,y\,dx = \frac{1}{2}y_{A_1}Q\varphi_1, \qquad (204)$$

где $y_{A_1}$ — статический прогиб под центром тяжести вала при изгибе по 1-й форме, определяемой графически или аналитически;
$Q$ — вес ротора;
$\varphi_1$ — безразмерный коэффициент, равный приблизительно отношению среднего прогиба к $y_{A_1}$

$$\varphi_1 = \frac{\int_0^l q(x)\,y\,(dx)}{Qy_{A_1}}. \qquad (204а)$$

Подставляя в (204)

$$Q = K_{A1}y_{A1}, \qquad (205)$$

где $K_{A1}$ — эквивалентная жесткость вала при изгибе по 1-й форме, получим

$$U = \frac{1}{2}y_{A1}^2K_{A1}\varphi_1, \qquad (206)$$

то есть

$$K_{A1} = \frac{\frac{1}{EI_0}\int_0^l\frac{M_1^2(x)}{I_x/I_0}\,dx}{y_{A1}^2\varphi_1} = \frac{Q}{y_{A1}}. \qquad (207)$$

Кинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2}\omega_1^2\frac{q_0}{g}\int_0^l\frac{q(x)}{q_0}y_1^2(x)\,dx = \frac{1}{2}m_{A1}\omega_1^2y_{A1}^2, \qquad (208)$$

где $m_{A1}$ — эквивалентная колеблющаяся масса при колебаниях по 1-й форме. Из (208)

$$m_{A1} = \frac{q_0\int_0^l\frac{q(x)}{q_0}y_1^2(x)\,dx}{gy_{A1}^2}. \qquad (208а)$$

Приравнивая (206) и (208), получаем

$$\omega_{1\text{кр}} = \sqrt{\frac{Q\varphi_1}{m_{A1}}\frac{1}{y_{A1}}} \qquad (209)$$

или иначе

$$\omega_{1\text{кр}} = \sqrt{\frac{K_{A1}\varphi_1}{m_{A1}}}. \qquad (209а)$$

Для вала постоянного сечения мы имели

$$y_1(x) = \frac{q}{24EI}(l^3x - 2lx^3 + x^4);$$

$$y_{A1} = \frac{5}{384}\frac{q_0l^4}{EI_0} = y_{\max};$$

$$m_{A1}=\frac{q_0\int\limits_0^l y_1^2(x)}{gy_{A1}^2}=\frac{q_0\int\limits_0^l\left(\frac{q_0}{24EI}\right)^2(l^3x-2lx^3+x^4)^2\,dx}{g\left(\frac{5}{384}\frac{q_0l^4}{EI_0}\right)^2}=$$

$$=\frac{q_0l\cdot 0,05\cdot 384^2}{g24^2\cdot 25}=0,5\,\frac{Q}{g}\,; \qquad (210)$$

$$\varphi_1=\frac{q\int\limits_0^l y\,dx}{Qy_{A1}}=0,64; \qquad (210а)$$

$$\omega_{1кр}=\sqrt{\frac{K_{A1}\varphi}{m_{A1}}}=1,1\sqrt{\frac{g}{y_{max}}}. \qquad (210б)$$

Для второй критической скорости возможно построить диаграммы $M(x)$ при изгибе по 2-й форме, определить центр тяжести массы и графически или аналитически найти прогиб $y_{A2}$, жесткость $K_{A2}$ и массу $m_{A2}$ по формулам:

$$K_{A2}=\frac{\frac{1}{2EI_0}\int\limits_0^{l/2}\frac{M_2^2(x)}{I_x/I_0}\,dx}{y_{A2}^2\varphi_2}=\frac{Q}{2y_{A2}}\,; \qquad (211)$$

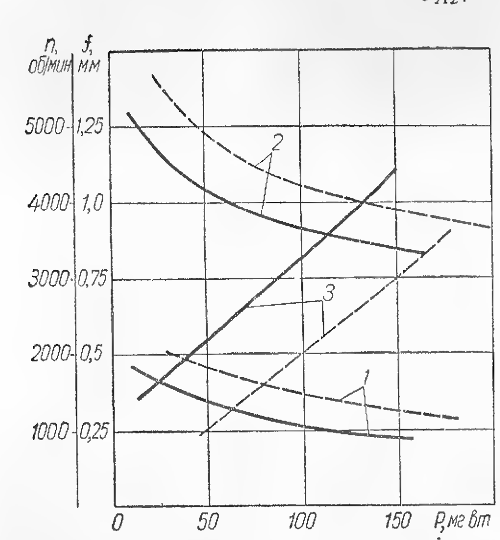



Рис. 136. Статические прогибы и критические скорости роторов турбогенераторов:

—обычное охлаждение ротора; — · — форсированное охлаждение ротора; *1* — первая критическая скорость; *2* — вторая критическая скорость; *3* — прогиб ротора.

$$m_{A2}=\frac{q_0\int\limits_0^{l/2}\frac{q(x)}{q_0}y_2^2(x)\,dx}{gy_{A2}^2}\,; \qquad (212)$$

$$\omega_{2кр}=\sqrt{\frac{Q\varphi_2}{2m_{A2}}\frac{1}{y_{A2}}} \qquad (213)$$

или

$$\omega_{2кр}=\sqrt{\frac{K_{A2}\varphi_2}{m_{A2}}}. \qquad (213а)$$

Пример расчета дан в гл. 12. На рис. 136 даны прогибы и критические скорости турбогенераторов в зависимости от мощности. Формулы (206) и (208) для ротора, имеющего участки постоянного сечения, можно представить в виде сумм.

Вместо (206) получаем

$$U=\frac{1}{2}(y_1Q_1+y_2Q_2+y_3Q_3+\ldots)=\frac{1}{2}y_{A1}^2K_{A1}\varphi_1, \qquad (214)$$

где $Q_1$, $Q_2$, $Q_3\ldots$ — веса участков 1, 2, 3, ...

Вместо (208)

$$T=\frac{1}{2}\omega_1^2(m_1y_1^2+m_2y_2^2+m_3y_3^2+\ldots)=\frac{1}{2}m_{A1}\omega_1^2y_{A1}^2, \qquad (215)$$

где $m_1=\frac{Q_1}{g}$; $m_2=\frac{Q_2}{g}$ и т. д.



Приравнивая (214) и (215), получим

$$\omega_{1кр}=\sqrt{\left(\frac{y_1Q_1+y_2Q_2+y_3Q_3+\ldots}{y_1^2Q_1+y_2^2Q_2+y_3^2Q_3+\ldots}\right)g}=\sqrt{\frac{K_{A1}\varphi_1}{m_{A1}}}. \qquad (216)$$

Из (216) получаем вместо (207) и (208а)

$$K_{A1}\varphi_1=\frac{y_1Q_1+y_2Q_2+y_3Q_3+\ldots}{y_{A1}^2} \qquad (216а)$$

(первое приближение $K_{A1}\varphi_1=\frac{0,66Q}{y_{A1}}$);

$$m_{A1}=\frac{Q_1y_1^2+Q_2y_2^2+Q_3y_3^2+\ldots}{gy_{A1}^2} \qquad (216б)$$

(первое приближение $m_{A1}\approx 0,6\,\frac{Q}{g}$).

Первое приближение для $\omega_{1кр}$ по (216)

$$\omega_{1кр}=\sqrt{\frac{1,1}{y_{A1}}g};\quad n_{1кр}=315\sqrt{\frac{1}{y_{A1}}}\ об/мин. \qquad (216в)$$

Для второй формы изгиба вторую критическую скорость $\omega_{2кр}$ получим аналогично (216)

В рассматриваемом методе предполагается, что формы статического и динамического изгиба одинаковы. Это предположение не должно привести к погрешностям, так как отношение динамических прогибов данного порядка к статическим равняется коэффициентам усиления, по (184)

$$\beta_\nu=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_{вр}}{\omega_\nu}\right)^2}, \qquad (217)$$

где $\omega_{вр}$ — угловая скорость вращения;

$\omega_\nu$ — собственная угловая частота колебаний для $\nu$-й гармонической прогиба.

При отклонениях $\omega_{вр}$ от $\omega_\nu$ $\beta_\nu\to 1$, поэтому динамические прогибы для любой гармоники, за исключением резонансной, при тех же силах будут равны статическим.

Критические скорости вала на трех опорах. В случае вала на трех опорах могут быть два вида колебаний (рис. 137). При равных массах и $l_1=l_2$ согласно [126] критическая скорость, соответствующая первому виду колебаний, определяется по (186), где статический прогиб находится по (171) при $l_1=l_2$. Критическая скорость, соответствующая второму виду колебаний, определяется так же по (186), но при этом прогиб определяется как для балки с одним заделанным и другим опертым концом

$$f_Q=\frac{7}{768}\frac{l_1^3}{EI}Q. \qquad (218)$$

Если массы и длины не одинаковы, прогибы находим по методу наложения (см. ниже)

На первый взгляд представляется неясным, почему силу веса $Q$ при колебаниях по типу *б* (рис. 137) направляют вверх Дело в том, что при динамических процессах поперечные колебания вала могут происходить по типу рис. 137, *б*. При этом центробежные силы от масс $\frac{Q_1}{g}$ и $\frac{Q_2}{g}$ будут противоположно направлены. Приравнивая эти силы силам упругости вала, получим уравнения колебаний, из которых следует, что для определения критических

скоростей достаточно определить результирующие статические прогибы в месте нахождения масс $Q_1$ и $Q_2$ при различных направлениях сил $Q_1$ и $Q_2$. Приравнивая кинетическую и потенциальную энергию колеблющегося вала, получим критическую скорость

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{Q_1 y_1 + Q_2 y_2}{Q_1 y_1^2 + Q_2 y_2^2}\, g}. \qquad (219)$$

Прогибы $f_1$ и $f_2$ (или $y_1$, $y_2$) в месте нахождения колеблющихся грузов $Q_1$ и $Q_2$, находящихся между крайними и средней опорой, можно определить по методу наложения прогибов. Для неподвижного вала направления сил от грузов $Q_1$ и $Q_2$ совпадают, и изгиб вала получается по типу *в* (рис. 137, *в*). Для вращающегося вала, как сказано выше, возможно обратное направление от центробежных сил при наличии прогибов $y_1$ и $y_2$ разного знака (тип *б*, рис. 137, *б*). Большие значения прогибов $y_1$ и $y_2$ получатся при изгибе от противоположно направленных сил $Q_1$ и $Q_2$.

Построим сначала диаграмму моментов от сил $Q_1$ и $Q_2$ при отсутствии средней опоры и определим указанным выше способом значения прогибов под грузами $Q_1$ и $Q_2$ ($y_1'$ и $y_2'$), а также прогиб $y_c$ в месте нахождения третьей (убранной) опоры. Приложим затем в точке $c$ такую силу $P_c$, чтобы прогиб в этой точке при $Q_1 = Q_2 = 0$ оказался равным и противоположным $y_c$ и определим прогибы $y_1''$ и $y_2''$ в местах $Q_1$ и $Q_2$ от этой силы. Тогда

$$y_1 = y_1' + y_2'' \quad и \quad y_2 = y_2' + y_2''.$$

Зная величины $y_1$ и $y_2$ по (219), определим критическую скорость.

Определить величину силы $P_c$ возможно рассмотренными выше методами определения прогиба в данной точке.

Рис. 137. Вал на трех опорах.

Выше (152) доказано, что для любого вала и в любой точке прогиб от силы $P_x$, приложенной в этой точке, можно определить по формуле

$$y_x = \frac{P_x}{k_x},$$

где $k_x$ — жесткость вала на прогиб относительно данной точки.

Для середины вала

$$k_x = k = \frac{48EI_{экв}}{l^3}.$$

Для какой-либо другой точки эквивалентная жесткость $k_x$ определяется по методам, указанным выше, как отношение силы $P_x$ к прогибу в точке $x$, вызываемому этой силой.



Определив величину $k_x$ и зная $y_x$, получим

$$P_x = y_x k_x; \quad P_c = y_c k_c.$$

Для симметричных валов $y_1 = y_2$ в случае изгиба по типу рис. 137, *б* прогиб может быть определен по диаграмме моментов для одной из половин так, как будто бы второй половины не было ($y_c = 0$, $P_c = 0$). При изгибе по типу рис. 137, *в* прогиб $y_1 = y_2$ определится по (218) как для балки, жестко закрепленной одним концом.

Результирующие прогибы для обоих типов колебаний (рис. 137, *б*, *в*) при постоянной жесткости вала удобно определять следующим методом. Разрежем балку по средней опоре и найдем момент, который необходимо приложить в месте разреза, чтобы углы наклона по обе стороны были равны (непрерывность изгиба). По [125] этот момент определяется из равенства углов наклона: а) от груза $Q_2$ для типа *б*

$$\frac{M_{c1} l_1}{3EI} = \frac{Q_2 c_2 (l_2^2 - c_2^2)}{6 l_2 EI} - \frac{M_{c1} l_2}{3EI}; \qquad (220)$$

б) от груза $Q_1$ для типа *б*

$$\frac{M_{c2} l_2}{3EI} = \frac{Q_1 c_1 (l_1^2 - c_1^2)}{6 l_1 EI} - \frac{M_{c2} l_1}{3EI}, \qquad (221)$$

откуда получаем

$$M_{c1} = \frac{Q_2 c_2 (l_2^2 - c_2^2)}{2 l_2 (l_1 + l_2)}; \quad M_{c2} = \frac{Q_1 c_1 (l_1^2 - c_1^2)}{2 l_1 (l_1 + l_2)} \qquad (222)$$

и прогибы

$$y_{1(\mp)} = \frac{Q_1}{k_1} - (M_{c2} \mp M_{c1}) \frac{l_1 (l_1 - c_1)}{6EI} \left[1 - \left(\frac{l_1 - c_1}{l_1}\right)^2\right]; \qquad (223)$$

$$y_{2(\mp)} = \frac{Q_2}{k_2} - (M_{c1} \mp M_{c2}) \frac{l_2 (l_2 - c_2)}{6EI} \left[1 - \left(\frac{l_2 - c_2}{l_2}\right)^2\right]. \qquad (223а)$$

Знак «минус» (—) в скобках для типа колебаний *б*.

Знак «плюс» (+) в скобках соответственно для типа колебаний *в*.

Таким образом, получаем две критические скорости:

$$\omega_{кр1} = \sqrt{\frac{Q_1 y_{1(-)} + Q_2 y_{2(-)}}{Q_1 y_{1(-)}^2 + Q_2 y_{2(-)}^2}\, g}; \qquad (224)$$

$$\omega_{кр2} = \sqrt{\frac{Q_1 y_{1(+)} + Q_2 y_{2(+)}}{Q_1 y_{1(+)}^2 + Q_2 y_{2(+)}^2}\, g}, \qquad (225)$$

где через $y_{1(-)}$ и $y_{2(-)}$ обозначены прогибы, рассчитанные по (223) и (223а) со знаком «минус» в скобках, а через $y_{1(+)}$ и $y_{2(+)}$ — прогибы со знаком «плюс» в скобках.

Подставляя значения $M_{c2}$ и $M_{c1}$ из (222), получаем

$$y_{1(\mp)} = \frac{Q_1}{k_1} - \left[\frac{Q_1 c_1 (l_1^2 - c_1^2)}{2 l_1 (l_1 + l_2)} \mp \frac{Q_2 c_2 (l_2^2 - c_2^2)}{2 l_2 (l_1 + l_2)}\right] \frac{l_1 (l_1 - c_1)}{6EI} (1 - \alpha_1^2); \qquad (226)$$

$$y_{2(\mp)} = \frac{Q_2}{k_2} - \left[\frac{Q_2 c_2 (l_2^2 - c_2^2)}{2 l_2 (l_1 + l_2)} \mp \frac{Q_1 c_1 (l_1^2 - c_1^2)}{2 l_1 (l_1 + l_2)}\right] \frac{l_2 (l_2 - c_2)}{6EI} (1 - \alpha_2^2), \qquad (227)$$

где $\alpha_1 = \frac{l_1 - c_1}{l_1}$ и $\alpha_2 = \frac{l_2 - c_2}{l_2}$, или еще более наглядно

$$y_{1(\mp)} = \frac{Q_1}{k_1} - \left[\frac{Q_1}{k_{11}} \mp \frac{Q_2}{k_{21}}\right]; \qquad (228)$$

$$y_{2(\mp)} = \frac{Q_2}{k_2} - \left[\frac{Q_2}{k_{22}} \mp \frac{Q_1}{k_{12}}\right], \qquad (229)$$

где

$$\frac{1}{k_1} = \frac{l_1^3}{48EI}; \qquad \frac{1}{k_2} = \frac{l_2^3}{48EI};$$

$$\frac{1}{k_{11}} = \frac{c_1 (l_1^2 - c_1^2)(l_1 - c_1)}{12 (l_1 + l_2) EI} (1 - \alpha_1^2);$$

$$\frac{1}{k_{21}} = \frac{l_1 c_2 (l_2^2 - c_2^2)(l_1 - c_1)}{12 l_2 (l_1 + l_2) EI} (1 - \alpha_1^2);$$

$$\frac{1}{k_{22}} = \frac{c_2 (l_2^2 - c_2^2)(l_2 - c_2)}{12 (l_1 + l_2) EI} (1 - \alpha_2^2);$$

$$\frac{1}{k_{12}} = \frac{l_2 c_1 (l_1^2 - c_1^2)(l_2 - c_2)}{12 l_1 (l_1 + l_2) EI} (1 - \alpha_2^2).$$

В частном случае при $l_1 = l_2$, $c_1 = \frac{l_1}{2} = c_2$, $Q_1 = Q_2$ получаются формулы [125], т. е.

$$y_{1(-)} = y_{2(-)} = \frac{Q_1}{k_1};$$

$$y_{1(+)} = y_{2(+)} = \frac{Q_1}{k_1} - \frac{18 l_1^3 Q_1}{1536 EI} = \frac{Q_1 l_1^3}{EI} \left[\frac{1}{48} - \frac{18}{1536}\right] = \frac{7}{768} \frac{Q_1 l_1^3}{EI}. \qquad (229а)$$

В качестве момента инерции $I$ в случае вала переменного сечения следует подставить эквивалентный момент $I_{экв}$ по (156).

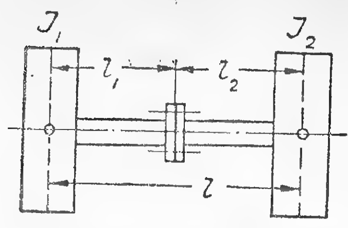



Рис. 138. Определение частоты колебаний кручения.

**4. Крутильные колебания валов. Общие уравнения колебаний кручения.** Угол закручивания вала $\varphi$ пропорционален приложенному моменту $M$ и обратно пропорционален жесткости вала на кручение $k$, т. е. $\varphi = \frac{M}{k}$, причем

$$k = \frac{GI_p}{l}, \qquad (230)$$

где $G$ — модуль сдвига;
$I_p$ — полярный момент инерции сечения вала: $I_p = 2I$; $I$ определяется по (152);
$l$ — длина (рис. 138).

Обратная величина $\frac{1}{k}$ называется «податливостью» вала.

Уравнение свободных крутильных колебаний массы $m$, насаженной на закрепленный вал, жесткость на кручение которого равна $k$, имеет вид, аналогичный (181), если вместо массы подставить момент инерции массы $J = mr_i^2$ и вместо линейного перемещения $y$ — угол закручивания $\varphi$:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k\varphi = 0 \text{ (без учета затухания).} \qquad (231)$$



Решение, аналогично (182), дает уравнение свободных крутильных колебаний

$$\varphi_0 = C \sin(\omega_0 t + \varphi), \qquad (232)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}} = \sqrt{\frac{GI_p}{lJ}} \qquad (233)$$

представляет угловую частоту свободных крутильных колебаний.

Для *двух масс*, насаженных на вал с *постоянной жесткостью* на расстоянии $l$ одна от другой, можно записать систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + k(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \\ J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} + k(\varphi_2 - \varphi_1) = 0 \end{aligned}\right\}, \qquad (234)$$

так как упругая сила пропорциональна относительному углу закручивания $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_{12} = \varphi$.

Система из двух масс приводится к одному уравнению вычитанием из первого уравнения второго с предварительным умножением первого на $J_2$, а второго на $J_1$. Получаем

$$J_1 J_2 \frac{d^2\varphi_{12}}{dt^2} + k(J_1 + J_2)\varphi_{12} = 0$$

или

$$J_{экв} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k\varphi = 0, \qquad (235)$$

где

$$J_{экв} = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$$

и представляет некоторый эквивалентный момент инерции.

*Две* массы дают всегда *одну* угловую частоту свободных колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J_{экв}}}. \qquad (236)$$

*Узловое сечение*, т. е. сечение, относительно которого происходит колебание дисков $J_1$ и $J_2$, может быть определено из того условия, что частоты колебания $J_1$ и $J_2$ одинаковы, т. е.

$$\sqrt{\frac{GI_p}{l_1} \frac{1}{J_1}} = \sqrt{\frac{GI_p}{l_2} \frac{1}{J_2}},$$

откуда

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{J_1}{J_2}. \qquad (237)$$

Уравнение (236) дает первую критическую скорость. Рассмотрение вопроса [67] показывает, что имеются высшие критические частоты, порядок которых подчиняется сложному закону. Однако их частоты весьма велики и не имеют в данном случае практического значения.

**Резонанс крутильных колебаний** возможен при наличии внешнего момента, имеющего одну или несколько периоди-

ческих составляющих частоты $\omega$, и при совпадении какой-либо вынужденной частоты со свободной. Так, при работе дизель-генератора или компрессорного двигателя момент внешних сил может быть представлен в виде ряда

$$M_в = M_0 + \sum_\nu M_\nu \sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu), \qquad (238)$$

где $M_0$ — среднее значение;

$\sum_\nu M_\nu \sin \omega_\nu t = \sum M_\nu$ — сумма гармонических, вызывающих колебания.

Частота вынуждающих колебаний может быть получена из разложения в ряд Фурье кривой тангенциальных усилий. Она зависит от числа цилиндров, числа тактов двигателя, а также (для многоцилиндрового двигателя) от углового расположения цилиндров, порядка зажигания и неравномерности работы отдельных цилиндров.

Приближенно частоту вынужденных колебаний определяют по формуле

$$\omega_\nu = \nu\omega_1,$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi n}{60}$, а $\nu$ — число импульсов за 1 оборот;

$$\nu = \frac{\text{число цилиндров}}{\text{число тактов}}; \quad \nu = 1, 2, 3 \ldots$$

Обычно учитывают только первую ($\nu = 1$), вторую и третью гармонические, так как обычно амплитуды убывают с увеличением $\nu$.

Постоянная слагающая внешнего момента $M_0$ (среднее значение) уравновешивается равным и обратным по знаку моментом электромагнитных сил (т. е. также средним значением). Гармонические моментов двигателя и генератора $M_1$ и $M_2$ остаются неуравновешенными и вызывают колебания кручения вала и колебания угла ротора в магнитном поле. Последние вызывают колебания тока и электрической мощности.

Система уравнений для случая двух масс, например первичного двигателя (или тормоза) $J_1$ и генератора (или двигателя) $J_2$ (рис. 138), при вынужденных колебаниях будет иметь вид

$$\left.\begin{aligned} J_1\ddot{\varphi}_1 + k(\varphi_1 - \varphi_2) = M_1(t) = M_1 \\ J_2\ddot{\varphi}_2 + k(\varphi_2 - \varphi_1) = M_2(t) = M_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (239)$$

где $M_1(t) = M_1$ и $M_2(t) = M_2$ — переменные (пульсационные) части внешнего и внутреннего моментов, вызывающие колебания относительно установившегося угла $\varphi_0$, зависящего от постоянных слагающих $M_{10} = -M_{20}$ и жесткости вала на кручение $k$, т. е.

$$\varphi_0 = (\varphi_1 - \varphi_2)_0 = \frac{M_{10}}{k} = -\frac{M_{20}}{k}. \qquad (240)$$

Умножая первое уравнение на $J_2$, а второе на $J_1$ и вычитая из первого второе, получаем

$$J_1 J_2 \varphi_{12}'' + k(J_1 + J_2)\varphi_{12} = M_1 J_2 - M_2 J_1, \qquad (241)$$



где

$$\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi.$$

Решение уравнения свободных незатухающих колебаний

$$\varphi_{св} = \varphi_m \sin(\omega_0 t + \gamma), \qquad (242)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}}. \qquad (243)$$

Правая часть уравнения (241) представляет сумму синусоидальных функций вида

$$M_\nu \sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu). \qquad (244)$$

В силу линейности уравнения результирующий угол кручения равен сумме углов, вызываемых отдельными гармоническими. Поэтому достаточно рассмотреть одну из них, т. е. $M_1$ или $M_2$.

Разделив все члены уравнения на $J_1 J_2$ и вводя для общности механическое затухание $\alpha_m$, получим

$$\varphi_\nu'' + \alpha_m \varphi_\nu' + \omega_0^2 \varphi_\nu = a_{1\nu} \sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu) - a_{2\nu'} \sin(\omega_{\nu'} t + \gamma_{\nu'}), \qquad (245)$$

где

$$a_{1\nu} = \omega_0^2 \frac{J_2}{J_1 + J_2} \frac{M_{1\nu}}{k} = \frac{M_{1\nu}}{J_1} \text{ и } a_{2\nu'} = \omega_0^2 \frac{J_1}{J_1 + J_2} \frac{M_{2\nu'}}{k} = \frac{M_{2\nu'}}{J_2}.$$

Сравнивая уравнение (245) с известным уравнением колебательного контура с $r$, $L$ и $C$

$$q_\nu'' + \alpha q_\nu' + \omega_0^2 q_\nu = C\omega_0^2 E_{1\nu} \sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu),$$

где

$$\alpha = \frac{r}{L} \text{ и } \omega_0^2 = \frac{1}{LC},$$

видим, что заряд $q_\nu$ соответствует углу поворота $\varphi_\nu$.

Решение уравнения (245), как известно, имеет вид

$$q_\nu = e^{-\frac{\alpha}{2}t}(A \sin \omega_0 t + B \cos \omega_0 t) + \beta_\nu C E_{1\nu} \sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu - \psi_\nu),$$

где

$$\beta_\nu = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_\nu^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha\omega_\nu}{\omega_0^2}\right)^2}}; \quad \operatorname{tg}\psi_\nu = \frac{\alpha\omega_\nu}{\omega_0^2 - \omega_\nu^2}. \qquad (246)$$

По аналогии с решением для заряда $q_\nu$ получим для угла закручивания $\varphi_\nu$

$$\varphi_\nu = e^{-\frac{\alpha_m}{2}t}(A \sin \omega_0 t + B \cos \omega_0 t) + \beta_\nu \frac{M_{1\nu}}{k} \frac{J_2}{J_1 + J_2} \sin(\omega_\nu t +$$

$$+ \gamma_\nu - \psi_\nu) - \beta_{\nu'} \frac{M_{2\nu'}}{k} \frac{J_1}{J_1 + J_2} \sin(\omega_{\nu'} t + \gamma_{\nu'} - \psi_{\nu'}). \qquad (247)$$

Обозначим через $f_{1\nu}(t)$ и $f_{2\nu'}(t)$ две последних функции и определим постоянные $A$ и $B$ из начальных условий. Положим при $t = 0$ $\varphi_\nu = 0$ и $\varphi_\nu' = 0$, тогда, если пренебречь составляющей, умножаемой на декремент $\frac{\alpha_m}{2}$, то есть при $\frac{\alpha_m}{2} \ll \omega_0$, получим

$$B = -f_{1\nu}(0) + f_{2\nu'}(0) \text{ и } A = -f_{1\nu}'(0)\frac{1}{\omega_0} + f_{2\nu'}'(0)\frac{1}{\omega_0}. \qquad (248)$$

При этом через $f_{1\nu}(0)$; $f_{2\nu'}(0)$; $f'_{1\nu}(0)$ и $f'_{2\nu'}(0)$ обозначены соответствующие функции и их производные при $t = 0$.

Найдя угол закручивания, получим и момент

$$M_\nu = \varphi_\nu k. \tag{249}$$

Из уравнения (245) и (247) видно, что *только часть* момента вынуждающей силы $M_{1\nu}$ или $M_{2\nu'}$ передается на вал ротора и скручивает его. Для $M_{1\nu}$ эта часть равна $\frac{J_2}{J_1 + J_2}$, а для $M_{2\nu'}$ она равна $\frac{J_1}{J_1 + J_2}$. Лишь в частном случае, когда $M_{1\nu} = -M_{2\nu'}$, $\beta_{\nu'} = \beta_\nu$, передается полный момент

$$M_\nu = \beta_\nu \left(\frac{J_2}{J_1 + J_2} M_{1\nu} - \frac{J_1}{J_1 + J_2} M_{2\nu'}\right) = \beta_\nu M_{1\nu}. \tag{250}$$

Это, между прочим, справедливо для постоянной составляющей момента из уравнения (238), когда $M_{10} = M_{20}$ и $M_0 = M_{10} = M_{20}$,

$$\varphi_0 = \frac{M_0}{k} = \frac{M_{10}}{k} = \frac{M_{20}}{k}. \tag{251}$$

Рассмотрим два наиболее важных случая расчета моментов (или углов) кручения:

1) когда можно принять $M_{1\nu} = 0$,
2) когда можно принять $M_{2\nu} = 0$.

Первый соответствует условиям при коротком замыкании синхронного генератора или грубых включениях в сеть. Электромагнитные (пульсационные) моменты генератора $M_{2\nu}$ достигают в этом режиме всьмикратного (и более) значения по отношению к номинальному, поэтому моментом $M_{1\nu}$ можно пренебречь. Второй случай соответствует работе синхронного двигателя на поршневой компрессор или работе дизель-генератора, когда имеют место пульсационные моменты $M_{1\nu}$, приложенные к валу со стороны компрессора или дизеля.

**Расчет скручивающих моментов на валу при работе дизель-генератора или компрессора.** В этом случае $M_{2\nu}$, как сказано выше, может быть принят равным нулю по сравнению с $M_{1\nu}$, и мы получаем из (247) для гармоники порядка $\nu$ скручивающий момент при установившемся режиме

$$M_\nu = \beta_\nu \frac{J_2}{J_1 + J_2} M_{1\nu} \sin(\nu\omega t + \gamma_\nu - \psi_\nu) \tag{252}$$

и

$$M = \sum_\nu M_\nu.$$

Соответственно из (249) угол закручивания

$$\varphi_\nu = \frac{M_\nu}{k} \text{ и } \varphi = \sum_\nu \varphi_\nu. \tag{253}$$

Гармонические $M_{1\nu}$ определяются из анализа кривой тангенциальных усилий дизеля или компрессора. Величина коэффициента усиления $\beta_\nu$ по уравнению (246) должна находиться в пределах



допустимых значений (т. е. не должна находиться в области резонанса, см. рис. 139).

Эти значения можно получить подбором определенной частоты свободных колебаний по (243), т. е. жесткости вала и моментов инерции.

**Расчет колебаний при коротком замыкании.** Рассмотрим полученный результат применительно к расчету крутильных колебаний при внезапном двухфазном коротком замыкании генератора (наиболее тяжелый случай).

На ротор генератора, момент инерции которого $J_2$, действует момент электромагнитных сил

$$M_2 = M_{1k} \sin \omega t - M_{2k} \sin 2\omega t$$

(без учета затухания), где

$$M_{1k} \approx \frac{2E^2}{x''_d + x_2}; \quad M_{2k} \approx \frac{1}{2} M_{1k}.$$

В пределе при

$$E = 1; \; x''_d = 0{,}1; \; x_2 = 0{,}2;$$

$$M_{1k} = 6{,}7\, M_N \text{ и } M_{2k} = 3{,}35\, M_N.$$

Моментом $M_{1\nu}$ со стороны двигателя можно, очевидно, пренебречь.

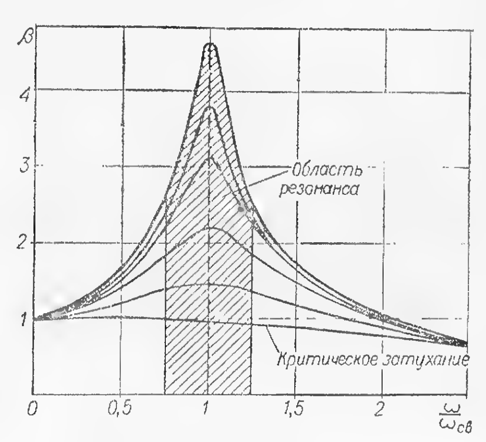



Рис. 139. Резонансные кривые.

Тогда по (247) получим, пренебрегая затухающим свободным колебанием, скручивающий момент на валу при двухфазном коротком замыкании

$$M = \beta_1 \frac{J_1}{J_1 + J_2} M_{1k} \sin \omega t + \beta_2 \frac{J_1}{J_1 + J_2} M_{2k} \sin 2\omega t,$$

где без учета затухания

$$\beta_1 = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}, \quad \beta_2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{2\omega}{\omega_0}\right)^2},$$

$$\omega_0 = \sqrt{k \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}}.$$

При отсутствии резонанса (незаштрихованная зона рис. 139) на вал и соединительную муфту передается только часть $\frac{J_1}{J_1 + J_2}$ от электромагнитного момента при коротком замыкании. Обычно в турбо- и гидрогенераторах $\frac{J_1}{J_2} \approx 1{,}0 \div 0{,}15$, поэтому при отсутствии резонанса скручивающий момент будет порядка номинального. Значительные моменты могут возникнуть при близких значениях $J_1$ и $J_2$ (мотор-генераторы) или при колебаниях, близких к резонансу.

Иногда желательно получить выражение для суммарного момента в первые периоды, когда свободный процесс не успел затухнуть, т. е. сумму свободного и вынужденного моментов

$$M = M_{св} + M_{вын}.$$

В этом случае согласно (245) и (247), беря только второй член, так как $M_{v1} \approx 0$, получаем

$$\varphi = \frac{J_1}{J_1 + J_2}\left\{\left[\beta_1 \frac{M_{1k}}{k}\sin\omega t - \beta_2 \frac{M_{2k}}{k}\sin 2\omega t\right] + \right.$$

$$\left. + e^{-\delta t}\left[\frac{\beta_2 M_{2k}}{k}\frac{2\omega}{\omega_{св}} - \frac{\beta_1 M_{1k}}{k}\frac{\omega}{\omega_{св}}\right]\sin\omega_{св} t\right\} \qquad (254)$$

и

$$M = \varphi k. \qquad (255)$$

*Вал переменного сечения.* Часто вал имеет переменное сечение и, следовательно, переменную жесткость по длине. В этом случае возможно привести его к валу эквивалентного по жесткости постоянного сечения $d_0$ и длины $l_0$.

Условия приведения следующие:

а) общий момент инерции действительного и приведенного вала должен быть один и тот же, т. е.

$$d_0^4 l_0 = \sum d_i^4 l_i;$$

б) «податливость» приведенного и действительного вала на кручение должна быть одинакова, т. е.

$$\frac{l_0}{GI_{p0}} = \sum_i \frac{l_i}{GI_{pi}}$$

или, что то же

$$\frac{l_0}{d_0^4} = \sum_i \frac{l_i}{d_i^4}.$$

Отсюда получаем

$$d_0 = \sqrt[8]{\frac{\sum d_i^4 l_i}{\sum \frac{l_i}{d_i^4}}}; \quad l_0 = \sum_i l_i \left(\frac{d_i}{d_0}\right)^4, \qquad (256)$$

где $i$ — номер участка диаметром $d_i$ и длиной $l_i$.

*Влияние веса вала на частоту крутильных колебаний.* В формулах (233) и (242) частота крутильных колебаний определяется только моментами инерции $J_1$ и $J_2$. Если масса вала сравнима с массами $J_1$ и $J_2$, то, согласно известному принципу, к величинам $J_1$ и $J_2$ можно прибавить по $\frac{1}{3}$ момента инерции части вала между узловым сечением и данным моментом инерции [126]. Практически эта поправка редко бывает значительной.



*Критические скорости крутильных колебаний при числе маховых масс, большем двух.* При двух массах получается одна критическая скорость, при трех массах — две скорости и при $n$ массах — $n - 1$ критических скоростей. Расчету этих скоростей посвящен ряд работ.

Общий метод определения частот сводится к нахождению корней определителя системы уравнений свободных колебаний масс, т. е.

$$\begin{gathered}
J_1\varphi_1'' + k_1(\varphi_1 - \varphi_2) = 0,\\
J_2\varphi_2'' + k_2(\varphi_2 - \varphi_3) - k_1(\varphi_1 - \varphi_2) = 0,\\
J_3\varphi_3'' + k_3(\varphi_3 - \varphi_4) - k_2(\varphi_2 - \varphi_3) = 0,\\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
J_{n-1}\varphi_{n-1}'' + k_{(n-1)}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) - k_{n-2}(\varphi_{n-2} - \varphi_{n-1}) = 0,\\
J_n\varphi_n'' - k_{n-1}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) = 0.
\end{gathered} \qquad (257)$$

Здесь $J_1\varphi_1''$, $J_2\varphi_2''$ и т. д. — силы инерции масс 1, 2 и т. д., $k_1(\varphi_1 - \varphi_2)$, $k_2(\varphi_2 - \varphi_3)$ и т. д. — упругие силы со стороны вала, пропорциональные жесткостям отдельных участков и относительным углам закручивания.

В символической форме, обозначая

$$\varphi'' = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = p^2\varphi,$$

система будет иметь вид:

$$\begin{gathered}
(J_1p^2 + k_1)\varphi_1 - k_1\varphi_2 = 0,\\
-k_1\varphi_1 + (J_2p^2 + k_2 + k_1)\varphi_2 - k_2\varphi_3 = 0,\\
\ldots - k_2\varphi_2 + (J_3p^2 + k_3 + k_2)\varphi_3 - k_3\varphi_4 = 0
\end{gathered} \qquad (258)$$

или

$$\begin{gathered}
a_1(p^2)\varphi_1 - k_1\varphi_2 = 0,\\
-k_1\varphi_1 + a_2(p^2)\varphi_2 - k_2\varphi_3 = 0,\\
0 - k_2\varphi_2 + a_3(p^2)\varphi_3 - k_3\varphi_4 = 0,\\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
-k_{n-2}\varphi_{n-2} + a_{n-1}(p^2)\varphi_{n-1} - k_{n-1}\varphi_n = 0,\\
-k_{n-1}\varphi_{n-1} + a_n(p^2) = 0,
\end{gathered} \qquad (259)$$

где для сокращения положено

$$\begin{gathered}
a_1(p^2) = J_1p^2 + 0 + k_1,\\
a_2(p^2) = J_2p^2 + k_1 + k_2,\\
a_3(p^2) = J_3p^2 + k_2 + k_3,\\
a_4(p^2) = J_4p^2 + k_3 + k_4,\\
\cdots\cdots\cdots\cdots\\
a_{(n-1)}(p^2) = J_{n-1}p^2 + k_{n-2} + k_{(n-1)},\\
a_n(p^2) = J_np^2 + k_{n-1} + 0.
\end{gathered} \qquad (260)$$

Определитель системы

$$\Delta = \begin{vmatrix}
a_1(p^2)\,(-k_1)\ \ldots \\
(-k_1)\,a_2(p^2)\,(-k_2)\ \ldots \\
\ldots\ (-k_2)\,a_3(p^2)\,(-k_3)\ \ldots \\
\ldots\ (-k_3)\,a_4(p^2)\,(-k_4) \\
\cdots\cdots\cdots\cdots
\end{vmatrix} = 0 \qquad (261)$$

позволяет определить частоты, являющиеся всегда вещественными, так как из него находятся $p_1^2$, $p_2^2$, ... и т. д. Один из корней всегда равен нулю, поэтому для $n$ уравнений получим $(n - 1)$ корней или $(n - 1)$ критических частот. Ни одна из этих частот не должна быть в резонансе с какой-либо вынужденной частотой, за исключением высоких порядков, как правило, быстро затухающих.

5. *Проверка вала по формуле сложного напряжения (на изгиб и кручение).* Касательное напряжение

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi d_{ц}^3} M_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{кр}}, \qquad (262)$$

где $M_{кр} = kM_N$; значения для $k$ берутся от 2,5 до 5 в зависимости от условий работы. Если момент знакопеременный, например,

$$M_k = kM_N (1 \pm k_п),$$

то, согласно приложению XII,

$$\tau_{ст} = \frac{kM_N}{W_{кр}} \quad и \quad \tau_п = \frac{kk_п M_N}{W_{кр}}, \tag{263}$$

где $W_{кр} = \frac{\pi d_ц^3}{16}$ — момент сопротивления кручению на цапфе.

Согласно [1], эквивалентное знакопеременное напряжение

$$\tau_\infty = k_\tau \tau_п + \tau_{ст} \frac{\sigma_e}{\sigma_s}, \tag{264}$$

где $k_\tau$ — коэффициент концентрации напряжений, причем $k_\tau \approx 1{,}3$;

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_s} = \frac{\text{предельно-прочное знакопеременное напряжение}}{\text{предел текучести}} \approx 0{,}6.$$

Напряжения от изгиба (знакопеременные)

$$\sigma_\infty = k_\sigma \frac{M_{изг}}{W_{изг}}, \tag{265}$$

где $W_{изг}$ — момент сопротивления изгибу,

$$W_{изг} = \frac{\pi d^3}{32};$$

$k_\sigma$ — коэффициент концентрации напряжений, причем $k_\sigma \approx 1{,}5$.

Изгибающий момент в общем случае, когда имеется сила, приложенная на свободном конце вала (натяжение ремня, зубчатая передача в сечении $aa$, рис. 129),

$$M_{изг} = \frac{Pb}{l}(l - c) + (P_\delta + Q)\frac{cd}{l}, \tag{266}$$

где $P_\delta = \frac{P_{\delta 0} k}{k - k_0}$ — установившаяся сила магнитного притяжения $Q$ — вес ротора.

В случае ременной передачи *

$$P = (3 \div 5)\, T,$$

где

$$T = \frac{2M_{кр}}{D_{шк}} \text{ — натяжение ремня,} \tag{267}$$

причем $D_{шк}$ — диаметр шкива.

Комбинированные напряжения

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_\infty^2 + 4\tau_\infty^2}. \tag{268}$$

Коэффициент загрузки по отношению к пределу усталости $\sigma_e$, равный $\varphi = \frac{\sigma_k}{\sigma_e}$ согласно [1], должен быть в пределах 0,5 — 0,6.

---

* Для зубчатой передачи см. приложение XII.



## 8-8. РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ

Задано: а) нагрузка на проекцию цапфы $p_ц = \frac{G}{d_ц l_ц}$; б) угловая скорость $\omega$.

1. Сила трения плоской поверхности, погруженной в жидкость, отнесенная к единице смоченной поверхности, равна

$$\tau = \lambda \frac{\partial u}{\partial y},$$

где $\lambda$ — динамическая вязкость жидкости, *секкг/м²*;

$u$ — скорость, *м/сек*;

$\frac{\partial u}{\partial y}$ — градиент скорости в направлении, перпендикулярном движению плоскости.

2. Коэффициент трения $\mu$ определяется как отношение касательного усилия к величине нормальной нагрузки на поверхность. На рис. 47 представлены кривые $\mu$ для пружинных подпятников, на рис. 46 даны вязкости масла различных сортов.

Для подшипников

$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda\omega}{p_ц \cdot 10^4}}\, C_\mu, \tag{269}$$

где $C_\mu$ — поправка на боковое растекание масла

$$C_\mu = \sqrt{\frac{4d_ц + l_ц}{l_ц}}; \tag{270}$$

$p_ц$ — нагрузка на проекцию цапфы, *кг/см²*; $\omega = 2\pi n \frac{1}{сек}$.

3. Критерием надежности работы подшипника является размер минимального зазора $h_0$ между цапфой и поддерживающей поверхностью (рис. 45)

$$h_0 = 0{,}5\,(1 - \chi)\,\delta = 0{,}5\,(1 - \chi)\,\psi d_ц. \tag{271}$$

Минимум потерь получится, когда относительный эксцентриситет

$$\chi = \frac{2e}{\delta} \approx 0{,}5.$$

Наименьшие допустимые величины $h_0$ по [1]:

а) жесткая посадка вкладыша — $h_0 = 0{,}2$ *мм*;

б) самоустанавливающаяся посадка — $h_0 = 0{,}02$ *мм*;

в) наивыгоднейший относительный диаметральный зазор $\psi = \frac{\delta}{d_ц}$

$$\psi = \sqrt{\frac{2\lambda\omega}{p_ц \cdot 10^4} \frac{l_ц}{d_ц + l_ц}} \approx \mu \sqrt{\frac{l_ц^2}{(d_ц + l_ц)(4d_ц + l_ц)}}; \tag{272}$$

Абсолютное значение диаметрального зазора

$$\delta = \psi d_ц.$$

Наименьшая допустимая толщина смазки

$$h_0 = 0{,}5(1 - \chi)\delta \approx 0{,}25\delta = 0{,}25\psi d_ц. \qquad (273)$$

Потери в подшипнике

$$p_т = 9{,}81\, G\mu v_ц\, вт, \qquad (274)$$

причем окружная скорость на цапфе — $v_ц$ *м/сек.*

Расход масла

$$V_м = \frac{p_т}{1700\,\theta_м}\ л/сек. \qquad (275)$$

Подсасываемое количество масла

$V'_м = 6nl_ц d_ц^2\psi \cdot 10^{-4}$ *л/сек*; при этом $n$ об/сек.

Нагрев масла в рабочем слое

$$\theta'_м = \frac{C_\mu p_т}{1700\, V'_м}\ {}^\circ C, \qquad (276)$$

где $V'_м$ выражено в *л/сек.*

Средний нагрев масла

$$\theta_м = \frac{p_т}{1700\, V'_м}\ {}^\circ C. \qquad (277)$$

Проверка загрузки подшипника по [1]:

$\sqrt{p_ц v_ц^3} < 6$ — возможна полугустая смазка;

$\sqrt{p_ц v_ц^3} = 6 \div 50$ — кольцевая смазка или дисковая без искусственного охлаждения подшипника;

$\sqrt{p_ц v_ц^3} = 50 \div 100$ — кольцевая или дисковая смазка, но требуется искусственное охлаждение (водяное или циркуляция масла);

$\sqrt{p_ц v_ц^3} > 100$ — необходима циркуляционная смазка.

## 8-9. РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ И ВЫБОР МАХОВОГО МОМЕНТА

Для компрессора или дизель-генератора существенное значение имеет расчет колебаний ротора в магнитном поле. Угол колебаний $\theta$ рассчитывается аналогично (181). Разница будет заключаться только в том, что частота свободных колебаний $\omega_0$ и декремент $\alpha$ определяются здесь не механическими параметрами вала (механическая жесткость и затухание), а электрическими параметрами (синхронизирующий и успокоительный моменты).

Уравнение малых колебаний угла мощности $\Delta\theta_\nu$ относительно $\theta_0$

$$H\frac{d^2\Delta\theta_\nu}{dt^2} + D\frac{d\Delta\theta_\nu}{dt} + M_m\cos\theta_0\Delta\theta_\nu = M_{1\nu}\sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu). \qquad (278)$$

При этом время $t$ выражено в электрических радианах ($t = 2\pi f_1 t_{(сек)}$);



$\omega_\nu$ — в долях $2\pi f_1 = \omega_1$;

$H$ — инерционная постоянная в радианах

$$H = 2\pi f_1 T i\ _{(сек)};$$

$D$ — успокоительный момент в долях единицы на единицу скольжения

$$s_\nu = \frac{d\Delta\theta_\nu}{dt}.$$

Разделив (278) на $H$, получаем

$$\Delta\theta''_\nu + \alpha\Delta\theta'_\nu + \omega_0^2\Delta\theta_\nu = \frac{M_{1\nu}}{H}\sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu), \qquad (279)$$

где

$$\alpha = \frac{D}{H};\ \omega_0^2 = \frac{M_m\cos\theta_0}{H} = \frac{k}{H};\ k = M_m\cos\theta_0.$$

При этом синхронизирующий момент соответствует «жесткости» системы и здесь определяется приближенно.

Угол $\theta_0$ соответствует среднему моменту и может быть определен по угловой характеристике или аналитически по формуле

$$\operatorname{tg}\theta_0 = \frac{I_{ср}\cos\varphi_{ср}}{\frac{U}{x_q} - I_{ср}\sin\varphi_{ср}}$$

(при опережающем угле сдвига тока $\sin\varphi_{ср}$ отрицательный).

Синхронизирующий момент $k$ при уточненных расчетах может быть найден из уравнений:

$$k \approx 0{,}9\left[\frac{U^2}{x_q} - UI_{ср}\sin\varphi_{ср} + U^2\left(\cos^2\theta_0\frac{x_q - x'_q}{x_q x'_q} + \sin^2\theta_0\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d}\right)\right];$$

$$k \approx \frac{0{,}9U^2\cos^2\theta_0}{x'_d},$$

где коэффициентом 0,9 учитываются активные сопротивления статора и ротора.

Решение (279) для установившихся качаний будет аналогично (247)

$$\Delta\theta_\nu = \beta_\nu\frac{M_\nu}{H\omega_0^2}\sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu - \psi_\nu) = \beta_\nu\frac{M_\nu}{k}\sin(\omega_\nu t + \gamma_\nu - \psi_\nu). \quad (280)$$

Коэффициент увеличения колебаний $\beta_\nu$ в соответствии с (246) показывает, во сколько раз амплитуда динамического угла качания больше статического

$$\Delta\theta_{\nu\,(ст)} = \frac{M_\nu}{k}; \qquad (281)$$

$$\beta_\nu = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\alpha\omega_\nu}{\omega_0^2}\right)^2}}. \qquad (282)$$

Выбор махового момента или постоянной инерции может быть теперь произведен следующим образом. Кривая тангенциальных усилий на валу машины раскладывается на гармо-

нические и определяются амплитуды $M_\nu$, частоты $\omega_\nu$ вынуждающих моментов в долях номинального. Тогда для любой гармоники по (280) получим значение амплитуды угла

$$\Delta\theta_{\nu\,\max} = \beta_\nu \frac{M_\nu}{k}. \qquad (283)$$

Допустимая величина $\Delta\theta_{\nu\,\max}$ определится допустимым колебанием электрической мощности или тока

$$\Delta I_{\nu\,\max} = k_i \Delta\theta_{\nu\,\max}, \qquad (284)$$

где

$$k_i \approx U \sqrt{\left(\frac{\cos\theta_0}{x_d'}\right)^2 + \left(\frac{\sin\theta_0}{x_q}\right)^2}.$$

Если считаться сначала только с основной гармоникой колебания (иногда основной гармоникой может быть гармоника $\nu = 2$) и принять в соответствии с [33] допустимое значение $\Delta I_{\nu\,\max} \approx \Delta I_{1\,\max} = 0{,}33$, то из (283) и (284) получим желаемую величину коэффициента увеличения колебаний

$$\beta_\nu = \frac{\Delta I_{\nu\,\max} k}{k_i M_\nu} \qquad (285)$$

(для $\nu = 1$ обычно должно быть $\beta_1 < 1{,}78$).

Допустимая частота свободных колебаний получится из (282), если положить в этом уравнении

$$\frac{\alpha}{\omega_\nu} = \delta_\nu \approx \frac{D\omega_\nu}{k},$$

то есть

$$\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0}\right)^2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\beta_\nu^2} - 1\right)(1 + \delta_\nu^2)}}{1 + \delta_\nu^2}. \qquad (286)$$

Из кривой резонанса (рис. 139) следует, что в «послерезонансной области» должно быть $\frac{\omega_\nu}{\omega_0} > 1{,}25$, а в «дорезонансной области» $\frac{\omega_\nu}{\omega_0} < 0{,}8$. Поскольку $H = \frac{k}{\omega_0^2}$, то из (286) находим необходимое значение инерционной постоянной и махового момента по гармонике порядка $\nu$

$$H = \frac{k}{\omega_\nu^2}\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0}\right)^2; \; T_i = \frac{H}{2\pi f_1}\text{ сек.}; \; GD^2 = T_i \frac{4P_{N\,(вт)}}{\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2}\, кгм^2, \qquad (287)$$

полагая вначале $\nu = 1$.

В большинстве случаев желательно, чтобы колебания имели место в «послерезонансной области», то есть при $\frac{\omega_\nu}{\omega_0} > 1$. При работе в «дорезонансной области» $\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0} < 1 \text{ при } \beta_\nu > 1\right)$ величина $H$ определяется из (287), полагая в (286) в числителе знак «минус».



Определим для примера требуемую постоянную инерции и маховой момент компрессорного двигателя 4000 *квт*; $n = 125$ об/мин, имеющего следующие данные: к. п. д. 0,955; $\cos\varphi = 0{,}9$ (опережающий); $\sin\varphi_{ср} = -0{,}435$; $P_N = \frac{4000}{0{,}9\cdot 0{,}955} = 4650$ *ква*,

$$x_d = 0{,}85;\; x_q = 0{,}505;\; x_d' = 0{,}3;\; D = \frac{M_{вх}}{s_{вх}} \approx 20;$$

первая гармоническая момента на валу $M_1 = 0{,}25$ (ее принимаем за основную). Заданное допустимое колебание тока $\Delta I_{1\,\max} = 0{,}33$. Определим жесткость $k$ при качаниях

$$k \approx \frac{0{,}9U^2\cos^2\theta_0}{x_d'} = \frac{0{,}9\cdot 0{,}875^2}{0{,}3} = 2{,}25;$$

$$\operatorname{tg}\theta_0 = \frac{I_{ср}\cos\varphi_{ср}}{\frac{U}{x_q} - I_{ср}\sin\varphi_{ср}} = \frac{1\cdot 0{,}9}{\frac{1}{0{,}505} + 0{,}435} = 0{,}375;$$

$$\cos\theta_0 = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2\theta_0} = 0{,}875;$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n}{60\cdot 2\pi f} = 0{,}0416;$$

$$k_i = 1\cdot\sqrt{\left(\frac{0{,}875}{0{,}3}\right)^2 + \left(\frac{0{,}435}{0{,}505}\right)^2} = 3.$$

По (285) — (287) получим

$$\beta_\nu = \frac{0{,}33}{3}\cdot\frac{2{,}25}{0{,}25} = 1;$$

$$\delta_\nu = \frac{20\cdot 0{,}0416}{2{,}25} = 0{,}37;$$

$$\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0}\right)^2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{1}{1} - 1\right)1{,}14}}{1{,}14} = 1{,}75;\; \frac{\omega_\nu}{\omega_0} = 1{,}32;$$

$$H = \frac{k}{\omega_\nu^2}\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0}\right)^2 = \frac{2{,}25\cdot 1{,}75}{(0{,}0416)^2} = 2270;$$

$$T_i = \frac{2270}{314} = 7{,}2\text{ сек.};$$

$$GD^2 = 7{,}2\,\frac{4\cdot 4650\cdot 10^3}{(13{,}1)^2} = 780\cdot 10^3\; кгм^2.$$

(В данном двигателе принято $GD^2 = 800\cdot 10^3$ *кгм²*, причем маховик с $GD^2_{мах} = 500$ *тм²* и ротор с $GD^2_{рот} = 300$ *тм²*). Как видно, при получившемся коэффициенте усиления $\beta_\nu = 1$ работа в дорезонансной области нежелательна, так как в данной области всегда $\beta_\nu > 1$.

20 685

В указанном выше методе определения махового момента могут быть приняты во внимание и другие гармонические ($\nu = 2$, $\nu = 3$ и т. д.); при этом по (280) и (284)

$$\Delta I = k_i \beta_1 \frac{M_1}{k} \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_2 M_2}{\beta_1 M_1}\right)^2 + \left(\frac{\beta_3 M_3}{\beta_1 M_1}\right)^2 + \ldots} = k_i \beta_1 \frac{M_1}{k} k_2, \quad (288)$$

где $k_2$ — величина корня. Вначале можно подставить в (288) $k_2 = 1$ и по (287) определить $H$ при $\nu = 1$, а затем определить при этом значении $H$ по (282) величины $\beta_2$, $\beta_3$ и т. д., после чего определить $k_2$ по (288) и получить по (286) новые значения $\left(\frac{\omega_\nu}{\omega_0}\right)^2$ и $H$ при $\nu = 1$.

---

РАЗДЕЛ II

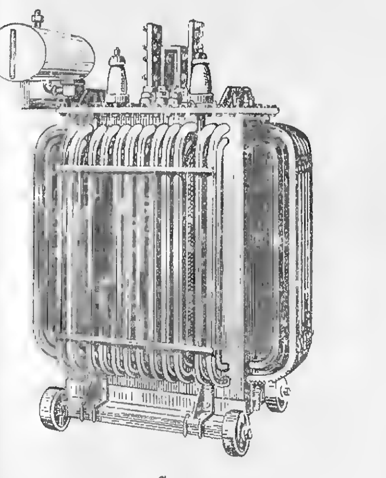
# МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ТРАНСФОРМАТОРОВ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

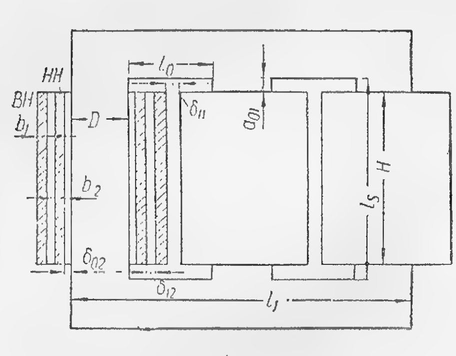
*Глава девятая*

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

### 9-1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ТИПЫ, ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

Трансформаторы являются одним из наиболее важных звеньев в системе передачи и распределения электрической энергии. Кроме того, трансформаторы широко применяются в виде специальных






а б

Рис. 140. Стержневой трансформатор 180 *ква*, 6 *кв*:
*а* — общий вид; *б* — расчетный эскиз.

типов (измерительные, печные, регулировочные, испытательные и т.п.). Общая мощность установленных трансформаторов в 5—6 раз превосходит установленную мощность генераторов электростанций.

По объему производства главное место занимают масляные силовые трансформаторы общего назначения, например, серия ТМ от 5 до 5600 *ква* (рис. 140), серия ТД мощностью от 7500 до 60 000 *ква*. Значительный объем также занимают трансформаторы сухие и спе-

циального назначения. Мощности, напряжения, относительный ток холостого хода, напряжения короткого замыкания, потери в меди и в стали трансформаторов подробно приводятся в сборниках общесоюзных стандартов (ГОСТ). Некоторые данные приведены в табл. 42.

Все силовые трансформаторы можно разделить на следующие типы:

1. Трехфазные двух- и трехобмоточные повышающие и понижающие трансформаторы стержневого типа общего назначения напряжением ниже 110 *кв*.

2 Трехфазные двух- и трехобмоточные повышающие и понижающие трансформаторы стержневого или броневого типа напряжением 110, 220, 400 *кв* и выше.

3. Однофазные (групповые) двух- и трехобмоточные повышающие и понижающие трансформаторы стержневого или броневого типа напряжением 110 *кв* и выше.

4. Высоковольтные мощные однофазные или трехфазные автотрансформаторы.

В данной главе рассмотрена методика расчета и проектирования в основном применительно к масляным трансформаторам напряжением ниже 110 *кв*. Что касается мощных и высоковольтных трансформаторов, то они рассматриваются главным образом в смысле общей характеристики возникающих здесь конструктивных и расчетных проблем. Для выяснения детальных вопросов их проектирования необходимо пользоваться специальными трудами [15], [100].

Силовые масляные трансформаторы серии ТМ условно разделяются на 4 габарита:

| | | |
|---|---|---|
| 1-ый габарит | $P = 5 - 100$ *ква*, | $U \leqslant 35$ *кв*; |
| 2-ой » | $P = 135 - 560$ *ква*, | $U \leqslant 35$ *кв*; |
| 3-ий » | $P = 750 - 5600$ *ква*, | $U \leqslant 35$ *кв*; |
| 4-ый » | однофазные $P \geqslant 5000$ *ква*,<br>трехфазные $P \geqslant 7500$ *ква*,<br>все трансформаторы с $U \geqslant 110$ *кв*. | |

Серия ТСМ отличается более высокими показателями за счет применения холоднокатаной стали и усовершенствования конструкции (снижение потерь на 20—25% при одновременном снижении веса и габаритов).

Основные направления технического прогресса в трансформаторостроении:

1. Увеличение к. п. д.
2. Повышение надежности в эксплуатации.
3. Уменьшение веса и габаритов.
4. Развитие мощных и высоковольтных силовых трансформаторов, обладающих транспортабельностью, надежностью и простотой обслуживания. Экономические выгоды повышения мощности станций, генераторов и трансформаторов хорошо известны: стоимость установленного киловатта резко уменьшается с ростом мощности станций и мощности машин.



5. Развитие мелких экономичных трансформаторов, в частности сухих и с алюминиевыми обмотками. Ввиду большого числа выпускаемых мелких трансформаторов экономический эффект от снижения их веса и повышения к. п. д. превосходит соответствующий эффект, получаемый в крупных трансформаторах.

Прогресс в отношении снижения веса можно видеть из табл. 42, сравнивая данные новой серии отечественных трансформаторов и старой серии ТМ.

По данным [70] вес современного трансформатора фирмы «Вестингауз» мощностью 360 *Мва* меньше веса трансформатора 45 *Мва* этой же фирмы, выпущенного 20 лет тому назад.

Повышение экономичности, снижение веса и габаритов возможно прежде всего путем рационального проектирования с учетом технологии производства и условий эксплуатации. Должно быть обращено внимание на повышение способности трансформатора выдерживать короткие замыкания (механическая прочность) и перенапряжения (импульсная прочность), а также на уменьшение добавочных потерь, выбор оптимальных параметров (напряжение короткого замыкания, коэффициенты трансформации), усовершенствование методов регулирования под нагрузкой, применение новых систем охлаждения, новых изоляционных, проводниковых, магнитных и конструктивных материалов и пр.

Повышение надежности эксплуатации дает применение полностью герметизированных трансформаторов, осуществленное в США для некоторых типов мощностью 5—25 *ква*, напряжением от 2,4 до 14,4 *кв*.

Понижение стоимости производства и уменьшение потерь для трансформаторов до 50 *ква* достигается применением магнитопроводов, намотанных из ленты.

Для регулирования напряжения в распределительных сетях иностранные фирмы употребляют вольтодобавочные трансформаторы, залитые эпоксидной смолой, что позволяет применять распределительные трансформаторы без регулировочных ответвлений.

Для крупных высоковольтных трансформаторов уменьшение габаритов получается при переходе от стержневого типа к броневому и при переходе от однофазных трансформаторов к трехфазным, в особенности с применением баков облегающей формы.

Широкое развитие получают автотрансформаторы, позволяющие получить более экономичную трансформацию энергии.

По данным [70] самый мощный трансформатор (390 *Мва*) перевозится в собственном баке.

Крупные перспективы имеются в усовершенствовании систем охлаждения трансформаторов. В СССР применяются:

а) естественное масляное охлаждение (ТМ, ТСМ);

б) дутьевое охлаждение (ТД, ОД);

в) дутьевое охлаждение с принудительной циркуляцией масла (ДЦ, ОЦ). В США применяется охлаждение трансформаторов:

а) естественное воздушное;

б) естественное воздушное с воздушнодутьевым (дутье повышает мощность на 15—33%);

в) естественное воздушное с двумя ступенями дутья. Трансформатор имеет три номинальные мощности. При включении двух ступеней дутья мощность повышается на 67%;

г) воздушнодутьевое с принудительной циркуляцией масла. Дутьевое охлаждение применяют для повышения мощности трансформатора в периоды максимумов.

Значительное повышение экономичности трансформаторов достигается применением алюминия. Известны конструкции (США, Англия) полностью алюминиевых трансформаторов мощностью 20 *Мва* и 70 *Мва*, 275/13,2 *кв*. В этих трансформаторах из алюминия сделаны не только обмотки, но также бак и другие детали. Применение алюминия особенно выгодно в сухих трансформаторах. Построены алюминиевые сухие трансформаторы от 225 до 3000 *ква*. Вес алюминиевой обмотки составляет около 50% от веса медной. Особенно перспективным является применение анодированного алюминия.

## 9-2. КОНСТРУКЦИЯ СТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Основными активными частями трансформатора являются магнитопровод и обмотки высшего (*ВН*) и низшего напряжения (*НН*), а в трехобмоточных трансформаторах и обмотка среднего напряжения (*СН*).

Бак и охладительное устройство, расширитель, отводы, вводы и конструктивные детали являются основными конструктивными частями трансформатора.

Магнитопровод. В качестве материала для магнитопровода применяется высоколегированная сталь марки Э43 (горячекатаная) или Э330 (холоднокатаная) толщиной 0,5 или 0,35 *мм* (приложение II).

Холоднокатаная сталь имеет бо́льшую магнитную проницаемость и меньшие потери, однако стоимость такой стали выше примерно на 60%. Кроме того, недостатком является магнитная анизотропия, сказывающаяся в том, что при прохождении потока под углом к направлению проката снижается магнитная проницаемость и увеличиваются потери. Качество магнитопровода из холоднокатаной стали может быть значительно улучшено за счет отжига листов и применения косых стыков. Использование холоднокатаной стали позволяет снизить потери и вес трансформатора, т. е. дает большой экономический эффект.

Для изоляции листов применяется бумага или лак. Бумажная изоляция (слой бумаги толщиной 0,035 *мм*), хотя и дешевле лаковой, имеет меньшую прочность и снижает коэффициент заполнения. Поэтому в мощных трансформаторах применяют обычно лаковую изоляцию. Поскольку катушки обмотки легче выполнить в виде цилиндра и такая обмотка имеет большую механическую прочность, то и сердечник выполняют ступенчатым, по форме сечения приближающимся к кругу (рис. 141). При сборке листы сердечника должны быть плотно стянуты для предотвращения вибраций и создания прочной конструкции. При диаметре до 25 *см* запрессовка

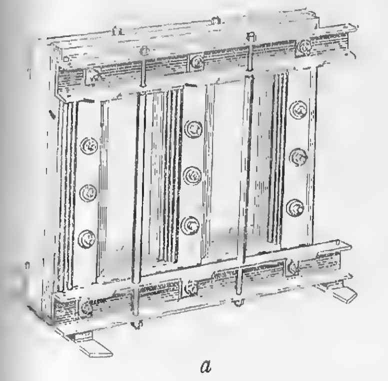


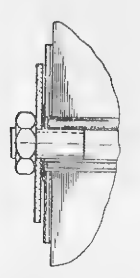
сердечника производится деревянными клиньями, помещаемыми между сердечником и цилиндром, на который намотана обмотка *НН*. При диаметре сердечника свыше 25 *см* прессовка производится шпильками, пропущенными через сердечник в изоляционных трубках.

Крепежные детали — шпилька с гайкой и шайбы — не должны выходить за пределы окружности сердечника. Для размещения крепежных деталей необходимо оставить свободным сегмент с достаточной высотой. Высота сегмента *f* может быть взята по табл. 21.

Определение ширины пакетов производится согласно рис. 141 с учетом свободных сегментов для стяжки сердечника и условий раскроя железа (рис. 155).

Стандартные листы трансформаторной стали имеют размеры 750×1500 и 1000×2000 *мм*. После обрезки кромок листов их ширина становится примерно 735 и 985 *мм*.





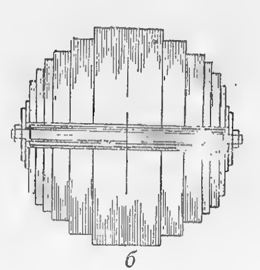


Рис. 141. Магнитопровод:
*а* — общий вид; *б* — сечение сердечника.

Для получения наименьших обрезков целесообразно брать ширину пакетов, близкую к одной из величин: 32, 39, 48, 56, 61, 66, 73, 81, 91, 105, 114, 122, 135, 147, 164, 175, 184, 195, 205, 215, 235, 245, 260, 280, 295, 310, 340, 350, 368, 420, 492, 520, 550, 610 *мм*.

При раскрое листов для трансформаторов большой мощности ширина больших пакетов помещается по ширине листа один раз. Остатки идут на сердечники трансформаторов меньших мощностей. Более подробные данные о конструкции магнитопровода приведены ниже.

Обмотки. В трансформаторах применяются следующие типы обмоток:

*Таблица 21*

**Высота прессовочного сегмента**

| Диаметр стержня *D* (в *см*) | 25,0—35 | 35—45 | 45—55 | 55—75 | 75—85 |
|---|---|---|---|---|---|
| Высота сегмента *f* (в *см*) . . . . . | 1,2 | 1,6 | 2,2—2,5 | 3—3,5 | 3,5—4 |

1. Цилиндрическая обмотка из прямоугольной меди как обмотка $HH$ при $P \leqslant 750$ *ква* и $U \leqslant 525$ *в*.

2. Цилиндрическая обмотка из круглой меди как обмотка $BH$ при $P \leqslant 560$ *ква* и $U \leqslant 35$ *кв*.

3. Катушечная цилиндрическая обмотка из круглой меди как обмотка $BH$ при $P \leqslant 1000$ *ква* и $U \leqslant 35$ *кв*.

4. Непрерывная обмотка из прямоугольной меди при $P = 180$—$60\,000$ *ква* и $U = 3 — 220$ *кв* как обмотка $BH$ и $HH$.

5. Винтовая обмотка как обмотка $HH$ при $P \geqslant 180$ *ква*, $I \geqslant 300$ *а* и $U \leqslant 11$ *кв*.

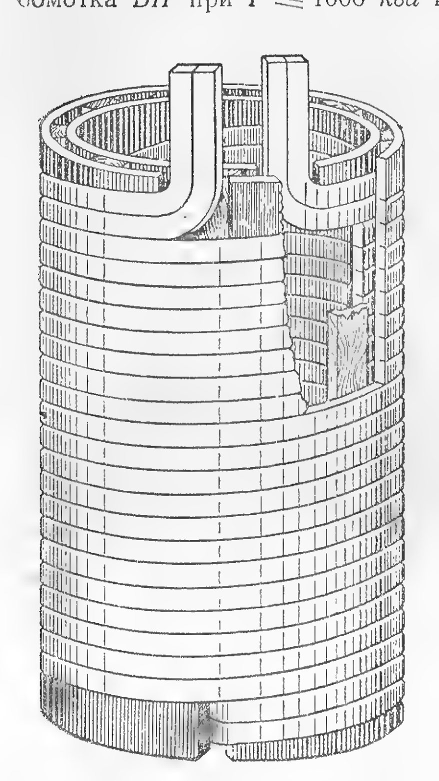


Рис. 142. Цилиндрическая двухслойная обмотка из прямоугольной меди.

При производстве цилиндрической обмотки из прямоугольной меди витки накладываются вплотную по цилиндрической поверхности (рис. 142). Намотка провода может производиться «плашмя» или «на ребро». Обычно применяются двухслойные цилиндрические обмотки. Для обеспечения охлаждения обмотки желательно, чтобы каждый слой обмотки соприкасался с масляным (или воздушным) каналом. Величина охлаждающего канала выбирается в соответствии с табл. 38.

Максимальная ширина меди между охлаждающими поверхностями (рис. 72) определяется:

при двухстороннем охлаждении

$$\beta_{max} \leqslant \frac{w}{10s^2} \text{ мм},$$

при одностороннем охлаждении

$$\beta_{max} \leqslant \frac{w}{20s^2} \text{ мм},$$

где $w$ — допустимая плотность теплового потока, *вт/м²* (табл. 36);
$s$ — плотность тока, *а/мм²*.

Масляный канал образуется благодаря установке осевых прокладок при намотке слоев.

В случае необходимости цилиндрическую обмотку мотают несколькими параллельными проводами, которые находятся обычно рядом, в один слой. При применении двухслойной цилиндрической обмотки между крайними витками двух слоев имеет место полное фазное напряжение. Соответственно с этим должна быть предусмотрена изоляция между слоями, осуществляемая в виде масляного канала или картонного цилиндра.



Осевой размер цилиндрической обмотки

$$H = (n + 1)\,a,$$

где $n$ — число витков в слое;
$a$ — осевой размер одного витка.

С учетом возможной неточности изготовления дается допуск в сторону увеличения порядка 1—2%.

Основной недостаток цилиндрической обмотки из прямоугольного провода — малая механическая прочность. Этим и определяется область применения этого типа обмотки.

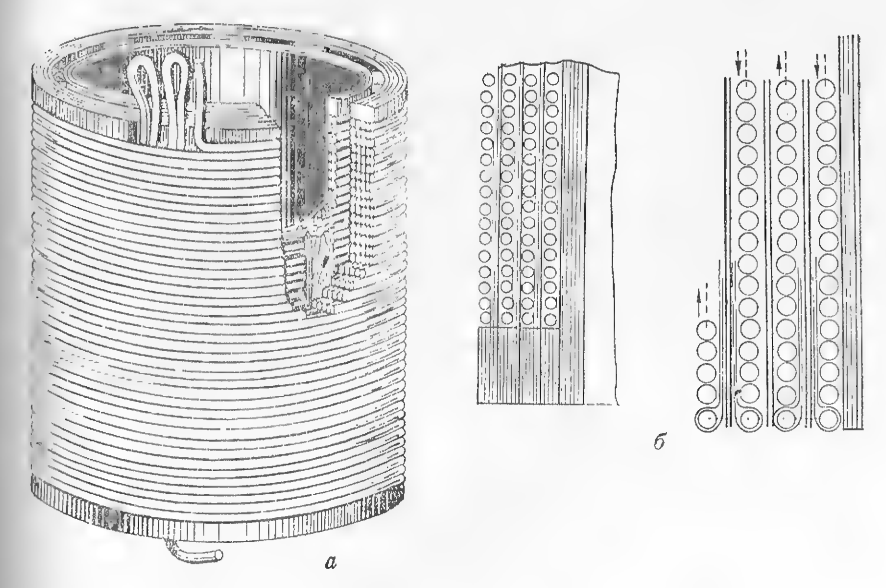



Рис. 143. Цилиндрическая обмотка из круглой меди: *а* — общий вид; *б* — схема намотки.

Цилиндрическая обмотка из круглой меди наматывается по тому же принципу, что и предыдущая обмотка, и имеет обычно несколько слоев (почему иногда называется слоевой или многослойной). Между отдельными слоями могут иметь место значительные напряжения. Изоляция витков оказывается недостаточной и приходится применять добавочную межслоевую изоляцию из нескольких слоев кабельной бумаги (рис. 143). Толщина этой изоляции и высота выступа на торцах даны в табл. 26.

Для уменьшения перепада температур внутри многослойной обмотки и получения допустимой величины теплового потока иногда обмотку разделяют на несколько концентрических катушек, отделенных друг от друга масляным каналом.

Максимальная толщина каждой катушки и осевой размер обмотки определяются аналогично предыдущему случаю. В основном эта обмотка находит применение в качестве обмотки $BH$ при

$P \leqslant 560$ *ква* и $U \leqslant 35$ *кв*. В случае применения этого типа обмоток при $U = 35$ *кв* обычно внутри обмотки размещают экран, представляющий металлический лист толщиной 0,4 — 0,5 *мм*, свернутый в виде разрезанного цилиндра, электрически соединенного с началом обмотки. Применение экрана значительно снижает межвитковые напряжения при импульсных перенапряжениях. Усиленную изоляцию в этом случае ставят только на конечных витках.

Недостатком этого типа обмотки является малая механическая прочность.

К а т у ш е ч н а я  ц и л и н д р и ч е с к а я  о б м о т к а состоит из ряда отдельных катушек, расположенных вдоль стержня. Каждая катушка представляет собой многослойную цилиндрическую обмотку из круглой меди. Для соединения между собой нижних либо верхних концов соседних катушек (т. е. начала с началом или конца с концом) последние мотают в разных направлениях. Поэтому число катушек обмотки обычно четное и выбирается таким образом, чтобы на каждую катушку приходилось не более 800—1000 *в*. Изоляция между соседними катушками осуществляется в виде радиального масляного канала или шайбами из картона (рис. 144). При применении подобных шайб в местах внутренних соединений их делают выступающими за наружную поверхность обмотки, в местах внешних соединений их делают с отворотами (угловые шайбы). При применении подобной обмотки можно значительно развить теплоотдающую поверхность.

а

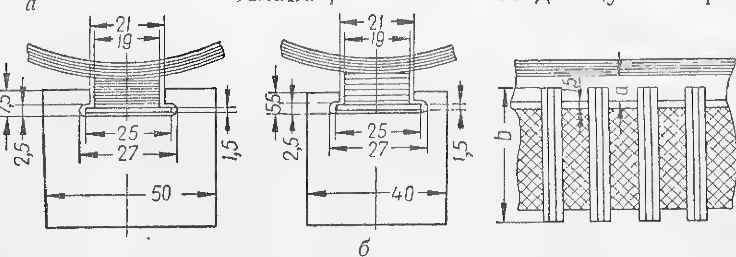



Рис. 144. Катушечная обмотка:
*а* — общий вид; *б* — дистанционные прокладки.

Ввиду сравнительной сложности изготовления эту обмотку применяют в тех редких случаях, когда сортамент прямоугольной меди не позволяет применить непрерывную обмотку, а по условиям изоляции и механической прочности нежелательно применение многослойной цилиндрической обмотки.



Наиболее широкое распространение в настоящее время имеет непрерывная с п и р а л ь н а я  к а т у ш е ч н а я  о б м о т к а. Подобная обмотка состоит из ряда катушек, представляющих плоскую спираль, соединенных последовательно и расположенных вдоль оси сердечника (рис. 145). Обмотка называется непрерывной, так как она выполняется одним или несколькими (не более 5—6) проводниками без перепайки концов последовательно соединенных катушек. При намотке последний виток катушки оказывается наверху, в то время как очередную катушку необходимо начать мотать с нижнего витка. Для того чтобы избежать неудобного перехода,

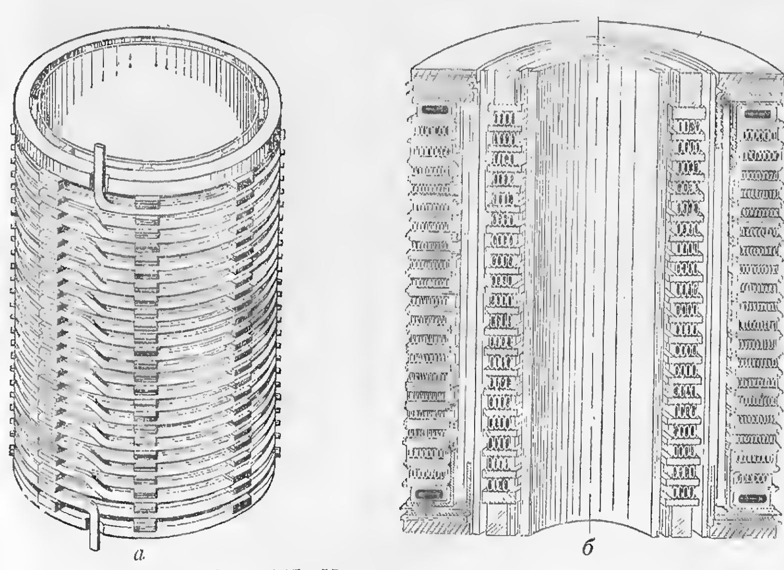



Рис. 145. Непрерывная обмотка:
*а* — общий вид; *б* — разрез.

после намотки второй катушки проводится перекладывание ее витков (верхние витки перекладываются вниз, а нижний — в верхние слои). После перекладки катушку передвигают к 1-й катушке, подтягивают провод и начинают намотку 3-й катушки и т. д. Между соседними катушками для целей изоляции и охлаждения обычно оставляют масляные каналы (табл. 38). В трансформаторах небольшой мощности каналы иногда делают через одну катушку. Изоляция между парными катушками осуществляется шайбами из электрокартона (2 × 0,5 *мм*). Переход между катушками делается между прокладками, образующими радиальные каналы. Число реек, на которых крепятся прокладки, выбирается из условий механической прочности. Для ориентировки при выборе числа реек могут служить следующие данные: 100 *ква* — 6 реек, 550 *ква* — 8 реек, 1800 *ква* — 8 ÷ 10 реек, 5600 *ква* — 10 ÷ 12 реек.

Ширина прокладок принимается от 3 до 5 *см*.

Витки, служащие для регулирования напряжения в обмотках *ВН*, располагаются в отдельных катушках так, чтобы регулировочные отпайки выполнялись в переходах между катушками, а не от средних витков. Крайние катушки обмотки обычно выполняются с усиленной витковой изоляцией. Желательно, чтобы радиальные размеры крайних, промежуточных и регулировочных катушек были равны. Допускается выравнивание радиальных размеров за счет вматывания между витками полосок картона. Непрерывная обмотка является одной из наиболее простых в изготовлении и надежных в механическом отношении.

В маломощных трансформаторах непрерывная обмотка вытесняется более простой в изготовлении цилиндрической обмоткой из прямоугольной меди.

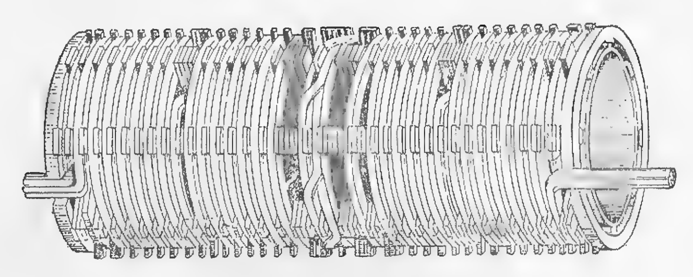


Рис. 146. Винтовая обмотка.

При больших значениях тока (большое число параллельных проводников) и наличии больших механических усилий применяется **винтовая обмотка**, представляющая собой модификацию цилиндрической обмотки из прямоугольной меди. Витки обмотки располагаются на цилиндрической поверхности в виде винтовой линии. Соседние витки накладываются не вплотную, а разделены радиальным масляным каналом, образованным радиальными прокладками, насаженными на рейки, расположенные в осевом направлении. Каждый виток состоит из нескольких параллельных проводников (рис. 146). При больших токах (большом числе параллельных ветвей) выполняют многоходовые винтовые обмотки.

Для уравнивания реактивного сопротивления параллельных проводников, расположенных в различных частях катушки, делают транспозицию проводников. Это делается как в непрерывных, так и в винтовых обмотках. Идеальным случаем является такое перемещение, когда каждый параллельный проводник располагается на всех возможных уровнях. Это так называемая полная транспозиция.

В непрерывных обмотках перемещение параллельных проводников легко осуществляется при перекладке катушек. В винтовой обмотке осуществление полной транспозиции значительно увеличивает осевой размер обмотки. Для уменьшения чисел переходов в винтовой обмотке применяют так называемые групповую и общую транспозицию. При групповой транспозиции все параллельные про-



водники делятся на 2 группы, которые меняются местами. Подобную транспозицию делают на $^1/_4$ и $^3/_4$ общего числа витков.

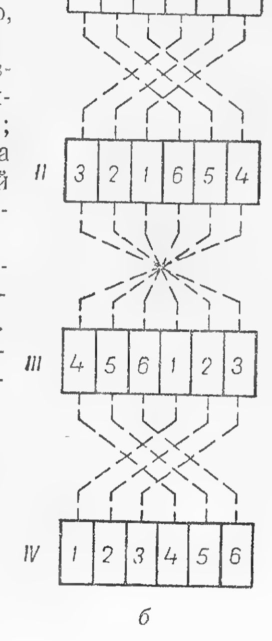
Общая транспозиция заключается в том, что все проводники меняют места на диаметрально противоположные. Она делается на $^1/_2$ общего числа витков (рис. 147).

**Система теплоотвода.** Потери, выделяемые в виде тепла в активных материалах, передаются в окружающую среду либо прямо, либо через промежуточную среду (масло).

По способу охлаждения трансформаторы различают: а) с естественным масляным охлаждением (ТМ — трехфазный, ОМ — однофазный); б) с масляным охлаждением и с обдувом бака (ТД и ОД); в) с принудительной циркуляцией масла (ТЦ и ОЦ); г) с воздушным охлаждением (сухие) (ТС и ОС).

Для масла необходим бак с соответствующей арматурой: расширитель, радиаторы, выхлопная труба, проходные изоляторы и т. д.

При проектировании трансформаторов в первую очередь необходимо выполнить ряд требо-




а

Рис. 147. Схемы транспозиции.
*а* — равномерно распределенная; *б* — одноходовой винтовой обмотки.

ваний, предъявляемых условиями эксплуатации и производства. Основными из них являются:

1) электрическая прочность конструкции должна обеспечивать изоляцию от пробоя при перенапряжениях, определяемых нормами или ГОСТ;

2) ни одна часть трансформатора при заданном режиме не должна перегреваться сверх установленных норм (термическая прочность);

3) ни одна часть конструкции не должна получать конечных деформаций при повторном воздействии сил, возникающих при коротком замыкании (механическая прочность);

4) напряжение короткого замыкания из условий параллельной работы и кратности токов короткого замыкания должно соответствовать заданию или нормам;

5) конструкция должна обеспечивать наибольшую экономичность, т. е. наименьшую затрату материалов и наименьшие затраты на амортизацию и потери.

Требования надежности конструкции в некоторой степени про-

тиворечат требованию экономичности. Поэтому решение вопроса о выборе оптимальной конструкции представляет сложную проблему.

**Изоляция.** Поскольку обмотки, их отводы и ответвления являются токонесущими частями, находящимися под напряжением, то требования электрической прочности относятся в первую очередь к ним. Электрическая прочность обеспечивается применением изоляции, которая в процессе работы подвергается действию электрических, тепловых и механических напряжений.

В эксплуатации изоляция должна выдерживать воздействие как номинальных рабочих напряжений, так и возможных перенапряжений.

Перенапряжения могут возникнуть в нормальном режиме при переключениях (коммутационные), при авариях (короткие замыкания) или за счет внешних влияний (атмосферные). Длительность перенапряжений обычно исчисляется сотыми долями секунды при величине перенапряжения, превышающей номинальное в несколько раз.

Изоляцию трансформатора обычно подразделяют на внешнюю (снаружи бака) и внутреннюю (внутри бака). Изоляция обмоток внутри бака в свою очередь может быть подразделена на главную (изоляция обмотки и отводов от других обмоток и от заземленных частей) и продольную (изоляция между витками, слоями, катушками данной обмотки).

Испытательные напряжения главной изоляции трансформаторов приведены в табл. 22.

*Таблица 22*

**Испытательные напряжения**

| Класс изоляции (в *кв*) | 3 | 6 | 10 | 15 | 20 | 35 | 110 | 154 | 220 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Максимальное рабочее напряжение (в *кв*) . . . | 3,5 | 6,9 | 11,5 | 17,5 | 23 | 38,5 | 121 | 169 | 242 |
| Испытательное напряжение для масляных трансформаторов (в *кв*) | 18 | 25 | 35 | 45 | 55 | 85 | $\frac{2[illegible]0}{200}$ | $\frac{320}{275}$ | $\frac{460}{400}$ |
| Испытательное напряжение для сухих трансформаторов (в *кв*) . | 10 | 16 | 23 | 35 | — | — | — | — | — |

Примечание. В знаменателях дроби указаны данные по проекту стандарта.

Обмотки с рабочим напряжением до 0,66 *кв* испытываются при напряжении 5 *кв*.



Вводы поставляются обычно в готовом виде и выбираются по рабочему напряжению и току. При расчете необходимо только определить расстояние между токоведущими частями вводов в воздухе, т. е. удовлетворить требованиям внешней изоляции. Выбор расстояний можно привести по табл. 23.

*Таблица 23*

**Изоляционные наружные расстояния**

| Класс изоляции (в *кв*) | Допустимые расстояния (в *см*): между вводами одной или разных обмоток | Допустимые расстояния (в *см*): от ввода до расширителя и выхлопной трубы |
|---|---|---|
| 3—6 | 9,0 | 11,0 |
| 10 | 13,5 | 14,0 |
| 35 | 33,0 | 34,0 |
| 110 | 90,0 | 96,5 |
| 150 | 126,0 | 134,0 |
| 220 | 177,0 | 196,5 |

Расстояние между ребрами вводов должно быть не меньше 1/3 указанных расстояний.

Данные главной изоляции трансформаторов с испытательными напряжениями от 5 до 85 *кв* приведены в табл. 24 и на рис. 148. Главная изоляция трансформатора с напряжением 110 *кв* приведена на рис. 149 (размеры приведены в *мм*).

*Таблица 24*

**Изоляционные промежутки масляных трансформаторов (*в см*)**

| Мощность трансформатора (в *ква*) | Испытательное напряжение обмоток высокого напряжения (*ВН*) (в *кв*) | *ВН* от стали | | Между *ВН* и *НН* | | Между *ВН* и *ВН* | | Выступ цилиндра $a_{ц2}$ | $U_{исп}$ *НН* (в *кв*) | *НН* от стали | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $a_{O_1}$ | $\Delta_i$ | $\delta_{12}$ | $\Delta_{12}$ | $\delta_{11}$ | $\Delta_{11}$ | | | $\Delta_{O2}$ | $\delta_{ц2}$ | $\delta_{O2}$ | $a_{ц2}$ |
| 10—100 | 18—25 | 2 | — | 0,85 | 0,25 | 1,0 | 0,2 | 1,0 | 5 | — | — | 0,5 | — |
| -180 | 18—25 | 3—5 | — | 1,7 | 0,5 | 1,0 | 0,2 | 1 | | — | — | 0,5 | — |
| 10—560 | | 3 | — | 1,2 | 0,3 | 1,4 | 0,2 | 1,6 | 18—25 | 0,25 | 0,6 | 1,2 | 1,8 |
| ≥750 | 35 | 3,5 | — | 1,7 | 0,5 | 1,4 | 0,2 | 1,6 | | 0,5 | 0,6 | 1,5 | 1,8 |
| 10—560 | 45 | 4 | — | 1,5 | 0,35 | 1,7 | 0,2 | 2,2 | 35 | 0,3 | 0,8 | 1,5 | 2,5 |
| ≥750 | | 4—5 | — | 1,7 | 0,5 | 1,7 | 0,2 | 2,2 | | 0,5 | 0,8 | 1,8 | 2,5 |
| 10—560 | | 5 | 0,2 | 1,8 | 0,4 | 2 | 0,3 | 3 | 45 | 0,[illegible]5 | 1,0 | 1,8 | 3,0 |
| ≥750 | 55 | 5 | 0,2 | 1,8 | 0,5 | 2 | 0,3 | 3 | | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 |
| 10—560 | | 6 | 0,2 | 2,7 | 0,5 | 3 | 0,3 | 4 | 55 | 0,4 | 1,3 | 2,1 | 4,5 |
| ≥750 | 85 | 7,5 | 0,2 | 2,7 | 0,5 | 3 | 0,3 | 5,5 | | 0,5 | 1,3 | 2,3 | 4,5 |
| 10—5600 | 230 | Изоляционные промежутки даны на рис. 149 | | | | | | | 85 | 0,6 | 1,9 | 3,0 | 7,0 |

Витковая изоляция обеспечивается собственной изоляцией обмоточной меди. Изоляция круглых проводов при диаметре до 1 *мм* — типа ПЭБО (провод эмалированный с бумажной оплеткой), при больших диаметрах — типа ПБ (провод, покрытый кабельной бумагой). Изоляция прямоугольных проводов — типа ПББО (провод с бумажной изоляцией и хлопчатобумажной оплеткой). Данные о толщине изоляции витка приведены в табл. 25.

Рис. 148. Изоляционные расстояния.

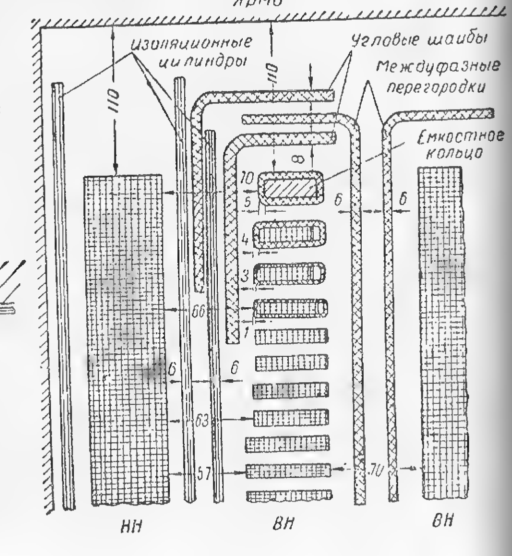



Рис. 149. Изоляция высоковольтных трансформаторов (110 *кв*).

*Таблица 25*

**Изоляция витков обмотки**

| Класс изоляции (в *кв*) | Толщина изоляции $\Delta_i$ на обе стороны (в *мм*) | | |
|---|---|---|---|
| | Промежуточные катушки | Начальная и конечная катушки | Вторая от начала и конца катушка |
| 6 | 0,45—0,55 | 0,45—0,55 | 0,45—0,55 |
| 10 | 0,45—0,55 | 0,45—0,55 | 0,45—0,55 |
| 20 | 0,45—0,55 | 1,00—2,00 | 1 |
| 35 | 0,45—0,55 | 1,4 | 1,4 |
| 110 | 1,00—2,00 | 3,00—4,00 | 1,40—2,00 |

Так как утолщение изоляции крайних катушек ухудшает условия охлаждения, то их сечение провода увеличивается в 1,5—2 раза по сравнению с другими катушками.

Межслоевая изоляция многослойных обмоток осуществляется намоткой бумаги в зависимости от величины межслоевого рабочего напряжения. Толщина межслоевой изоляции указана в табл. 26.



*Таблица 26*

**Межслоевая изоляция**

| Межслоевое рабочее напряжение (в *в*) | 1000 | 1000—2000 | 2000—3000 | 3000—3500 | 3500—4000 | 4000—4500 | 4500—5000 | 5000—5500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Толщина изоляции (в *мм*) | 2×0,12 | 3×0,12 | 3×0,12 | 5×0,12 | 6×0,12 | 7×0,12 | 8×0,12 | 9×0,12 |
| Выступ на торцах (в *см*) | 1 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |

В катушечной обмотке толщина слоевой изоляции $\Delta_i$ в зависимости от межслоевого напряжения $\Delta U_c$ принимается: при $\Delta U_c = 150$ *в* $\Delta_i = 2 \times 0,06$ *мм*; при $\Delta U_c = 150 - 200$ *в* $\Delta_i = 1 \times 0,2$ *мм*; при $\Delta U_c = 200 - 300$ *в* $\Delta_i = 2 \times 0,2$ или $1 \times 0,5$ *мм*.

Масляный канал между катушками из условий изоляции

$$\delta = 0,3 \frac{\Delta U}{1000},$$

где $\Delta U$ — рабочее напряжение между катушками, *в*.

По условиям охлаждения этот канал нельзя брать меньше 0,4 *см*.

Минимальные размеры канала в месте разрыва между регулировочными катушками (рис. 150) даны в табл. 27.

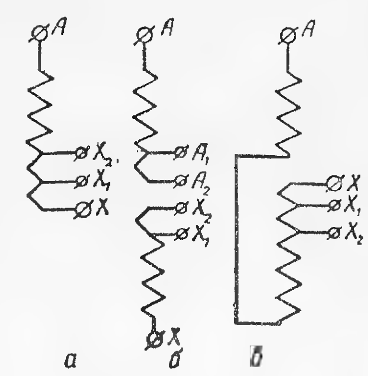



Рис. 150. Схемы регулирования напряжения.

*Таблица 27*

**Изоляция в месте разрыва между регулировочными катушками**

| Рабочее напряжение (в *кв*) | Схема регулирования по рис. 150 | Изоляция в месте разрыва | Размер канала (в *см*) |
|---|---|---|---|
| 6 | *б* | Масляный канал | 1,2 |
| 10 | *б* | Масляный канал или угловые и простые шайбы | 1,8 |
| 35 | *б* | Масляный канал или угловые и простые шайбы | 2,5 |
| 35 | *в* | Масляный канал | 1,2 |

При рассмотрении внутренней изоляции существенным вопросом является выбор изоляционных расстояний между отводами и поверхностями обмоток и заземленных частей, табл. 28. Для отводов при $U \leqslant 35$ *кв* может применяться неизолированный, изолированный кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми трубками провод. Обычно отводы от обмоток выполняются кабелем. При проходе через деревянные детали отводы изолируются дополнительно.

*Таблица 28*

**Изоляция отводов**

| Испытательное напряжение отвода (в *кв*) | Диаметр отвода (в *см*) | Толщина изоляции на одну сторону (в *мм*) | Расстояние отвода (в *см*): до собственной обмотки или заземленных частей | Расстояние отвода (в *см*): до соседней обмотки | Расстояние отвода (в *см*): испытательное напряжение обмотки (в *кв*) |
|---|---|---|---|---|---|
| до 25 | <0,6 | 0,0 | 2,5 | 4,5 | до 35 |
| | >0,6 | 0,0 | 2,5 | 4,5 | |
| | >0,6 | 0,2 | 2,0 | 3,5 | |
| 35 | <0,6 | 0,0 | 4,2 | 9,0 | 85 |
| | >0,6 | 0,0 | 3,5 | 9,0 | |
| | >0,6 | 0,2 | 2,0 | 5,0 | |
| 85 | ⩾0,6 | 0,4 | 4.0(4,2) | 25,0 | 230 |
| | ⩾0,6 | 0,6 | 3,5(4,0) | 19,0 | |
| 230 | 1,25 | 2,0 | 11(19,0) | 10,5 | 230 |

Примечание. Размеры в скобках — это расстояния от прессующей балки ярма.

При тепловом воздействии происходит так называемое старение изоляции. Сблюдение норм перегрева, установленных ГОСТ, обеспечивает длительный период (15—20 лет) эксплуатации без значительного ухудшения качества изоляции.

Конструкция баков дана ниже (стр. 356 и приложение VIII). Другие конструктивные детали даны подробно в [15], [100].

## 9-3. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ И ИХ СООТНОШЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

В ряде трудов на основе опыта имеются практические указания о выборе размеров и их соотношений в машинах и трансформаторах. Существует понятие соразмерности конструкции. Соразмерность следует понимать в смысле наиболее экономических соотношений размеров отдельных частей машины. Впервые теорию соразмерности дал М. Видмар. Суть этой теории применительно к трансформаторам сводится к законам распределения потерь в меди и стали; распределения стоимостей меди и стали; распределения потерь в ярме и стержнях; распределения стоимостей ярма и стержней.

Согласно закону равномерного распределения стоимостей, стоимость активных материалов разделяется на 4 равные части: 1) стержней, 2) ярем, 3) первичной обмотки, 4) вторичной обмотки. Потери в этих четырех частях должны также составлять по $^1/_4$ суммарных потерь.

Закон распределения стоимостей, так же как и закон распределения потерь, является, как показано ниже, частным случаем и не может являться основным критерием при проектировании экономичных трансформаторов.



На основании формулы (50) гл. 1 расход меди и железа связан с потерями таким сбразом, что при постоянстве $s$ и $B$ чем меньше выбраны потери, тем меньше будет расход материалов. Если же мощность, м. д. с. и поток машины заданы, то при уменьшении потерь $s$ и $B$ уменьшаются, а расход материалов возрастает. Существует вполне определенное экономическое значение суммарных потерь и их отношения.

Как указывалось в гл. 2, относительные потери изменяются по закону

$$\frac{\sum p}{P_N} = k_э \left(\frac{1}{P_N}\right)^{1/4},$$

где

$$k_э = c_p \frac{s^2 k_{Cu} + \psi_1 B^2 k_{Fe}}{(sB)^{3/4}};$$

$\psi_1$ — отношение веса железа к весу меди;

$$c_p \approx \text{const}.$$

Для величины $k_э$ при $B = \text{const}$ существует минимум при определенном значении плотности тока $s_0$. Экономическая плотнсеть тока $s_э$ ($s_э > s_0$) получается из условия минимума действительной стоимости

$$M_д = M_m + M_p = M_m + k\Sigma' p.$$

При этом предполагается, что все заданные технические условия выполняются.

Относительная стоимость материалов согласно гл. 2 изменяется по закону

$$\frac{M_m}{P_N} = c_m \left(\frac{1}{P_N}\right)^{1/4} m_м \left(\frac{1}{sB}\right)^{3/4},$$

где $c_m \approx \text{const}$.

Следовательно, относительная действительная стоимость пропорциональна

$$\frac{M_д}{P_N} \equiv \left(\frac{1}{P_N}\right)^{1/4} \left(\frac{1}{sB}\right)^{3/4} \left[1 + \frac{k}{m_м}(s^2 k_{Cu} + \psi_1 B^2 k_{Fe})\right],$$

где

$k$ — коэффициент приведения

$$k = \frac{m_{рн} t_{нг}}{\varepsilon};$$

$m_м$ — приведенная к меди цена материалов

$$m_м = m_{Cu} + \psi_1 m_{Fe}.$$

Минимум $\frac{M_д}{P_N}$ получится при

$$p'_{Cu\,(э)} = s_э^2 k_{Cu} = \frac{3}{5}\left(\frac{m_м}{k} + \psi_1 B^2 k_{Fe}\right)$$

или при

$$s_э = \sqrt{\frac{3}{5k_{Cu}}\left(\frac{m_м}{k} + \psi_1 B^2 k_{Fe}\right)}.$$

Если исходить из минимума годовых потерь с учетом различной стоимости потерь в меди или нагрузочных потерь $m_{рн}$ и потерь в железе $m_{ро}$ и учесть число годовых часов нагрузки $t_{нг}$ и число часов включения $t_{ог}$, то вместо коэффициента $\psi_1$ войдет коэффициент

$$\psi_1' = \psi_1 \frac{t_{ог} m_{ро}}{t_{нг} m_{рн}}.$$

Оптимальное отношение потерь получается в виде

$$\xi = \frac{p_{Cu}}{p_{Fe}} = \frac{p'_{Cu\,(э)} G_{Cu}}{k_{Fe} B^2 G_{Fe}} = \frac{3}{5}\left(1 + \frac{m_{Cu} + m_{Fe}\psi_1}{kB^2 k_{Fe}\psi_1 \frac{t_{ог} m_{ро}}{t_{нг} m_{рн}}}\right).$$

Как видно, оптимальные значения $\xi$ и $\psi_1$ связаны между собой. Например, при $\psi_1 = 5$; $m_{Cu} = 20\ \frac{руб}{кг}$; $m_{Fe} = 4\ \frac{руб}{кг}$ (с учетом обработки); $k = 1000 \frac{руб}{квт}\left(1\ \frac{руб}{вт}\right)$; $\frac{t_{ог} m_{ро}}{t_{нг} m_{рн}} \approx 1$; $B^2 k_{Fe} = 3\ \frac{вт}{кг}$ $\xi = 2{,}2$.

Как известно, трасформатор близок к оптимальному, когда стоимость меди близка к стоимости железа, т. е.

$$\psi = \frac{m_{Fe} G_{Fe}}{m_{Cu} G_{Cu}} \approx 1.$$

При этом

$$\psi_1 = \frac{G_{Fe}}{G_{Cu}} \approx \frac{m_{Cu}}{m_{Fe}},$$

т. е. отношение весов железа и меди равно обратному отношению их цен. Если

$$\frac{t_{ог} m_{ро}}{t_{нг} m_{рн}} = 1 \text{ и } \psi_1 = \frac{m_{Cu}}{m_{Fe}},$$

то

$$\xi = \frac{3}{5}\left(1 + \frac{2m_{Fe}}{kB^2 k_{Fe}}\right).$$

При оптимальных условиях стоимость удельных потерь в железе за период окупаемости должна быть равна цене железа

$$kB^2 k_{Fe} = m_{Fe},$$

и мы получаем $\xi = \frac{9}{5}$. По методу, рассмотренному ниже, оптимальное значение $\xi$ получается около 3. Дело в том, что при увеличении потерь в меди расход меди уменьшается. Это можно показать на простом примере. Уменьшим в каком-либо трансформаторе сечение меди в $n$ раз. При неизменном сердечнике вес меди также уменьшится в $n$ раз, а потери в меди возрастут в $n$ раз, т. е. при этих условиях $p_{Cu} G_{Cu} = \text{const}$. Медь дефицитный материал, и, желая уменьшить ее расход, конструктор берет отношение потерь больше единицы. Если сумма потерь должна оставаться постоянной, то потери в стали должны быть соответственно уменьшены, а расход стали увеличен. При этом в определенных пределах $\xi$ может получиться снижение стоимости трансформатора. Как известно, максимум к. п. д. электрической машины получается при равенстве постоянных и переменных потерь. Если бы трансформатор был нагружен все время номинальной нагрузкой, то наибольший годовой к. п. д. был бы при $\xi = 1$. Однако в процессе эксплуатации среднегодовая нагрузка $P_{ср}$ меньше номинальной. Максимум среднегодового к. п. д. получится при равенстве среднегодовых постоянных и переменных потерь

$$p_{Cu\,(ср)} = p_{Fe}.$$

Равенство среднегодовых постоянных и переменных потерь может быть обеспечено в том случае, если отношение потерь при номинальной нагрузке будет равно отношению квадратов номинальной и среднеквадратичной мощности нагрузки за время подключения трансформатора, т. е.

$$\xi = \frac{p_{Cu}}{p_{Fe}} = \frac{p_{Cu}}{p_{Cu\,(ср)}} = \left(\frac{P_N}{P_{эф}}\right)^2.$$

С другой стороны, если обозначить годовые потери энергии в меди в виде $p_{Cu\,N} t_{нг}$ и годовые потери энергии в железе $p_{Fe} t_{ог}$, где $t_{нг}$ — число часов эквивалентной эффективной нагрузки, а $t_{ог}$ — число часов в году, когда трансформатор подключен к сети, то

$$\xi = \frac{t_{ог}}{t_{нг}} = \left(\frac{P_N}{P_{эф}}\right)^2.$$

При этом не учитывается разная цена потерь в меди и в железе. Если учитывать эту разницу цен, то оптимальное значение $\xi$ должно лежать в пределах

$$1 < \xi < \frac{t_{ог} m_{ро}}{t_{нг} m_{рн}}.$$

Необходимо отметить, что точный учет загрузки при проектировании трансформаторов невозможен, так как график изменяется в различных условиях по-разному. Поэтому исходят из среднестатистических данных или из типовых графиков нагрузки. Так, для высоковольтных мощных трансформаторов $\left(\frac{P_N}{P_{эф}}\right)^2$ составляет минимальную величину и для них выгодно брать $\xi = 3 - 4$.

Для силовых распределительных и осветительных трансформаторов следует брать $\xi = 3{,}5 - 4{,}5$.

При выборе оптимального значения $\xi$ принимаются в соображение не только условия максимального годового к. п. д., но и условия получения трансформатора минимального веса и стоимости. Расчеты показывают, что с этой точки зрения величина $\xi$ также получается в указанных выше пределах.

Выбор величины $\xi$ и ее влияние на экономичность трансформатора является важным вопросом как для производства, так и для эксплуатации трансформаторов и требует детального исследования.

Обычно относительные потери и их распределение для серийных трансформаторов нормированы и задаются при проектировании

трансформатора. Плотности тока и индукции определяются не только экономическими, но и рядом других условий (нагрев, насыщение, допустимые механические напряжения в обмотках при коротких замыканиях и пр.). Поэтому целесообразно при проектировании ориентироваться на данные построенных и хорошо работающих трансформаторов (табл. 42).

Наиболее простым методом изучения экономических размеров и соотношений трансформаторов и электрических машин является метод анализа уравнения мощности. Диаметр стержня трансформатора по уравнению (20) гл. 1 равен

$$D = \sqrt[4]{\frac{8P}{m\pi^2 \sqrt{2}\, fsB\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}\alpha\lambda}}. \quad (1)$$

Как видно, диаметр определится заданной мощностью $P$, числом фаз (стержней) $m$, частотой $f$, индукцией $B$, плотностью тока $s$, коэффициентами заполнения окна $\varphi_{Cu}$ и стержня $\varphi_{Fe}$ и двумя геометрическими соотношениями $\alpha$ и $\lambda$

$$\alpha = \frac{l_s}{D} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{l_0}{2D}, \quad (2)$$

где $l_s$ — длина (высота) стержня;
$l_0$ — ширина окна (рис. 140, *б*).

Диаметр $D$ и отношение $\alpha$ и $\lambda$ определяют собой размеры магнитопровода, а при определенных значениях $s$ и $\varphi_{Cu}$ и размеры обмоток трансформатора. Поставим сначала задачу найти экономические значения отношений $\alpha$ и $\lambda$ *при условии постоянства* $s$, $B$, $\varphi_{Cu}$ и $\varphi_{Fe}$*.

При этом, как показано ниже, выбор оптимальных удельных нагрузок и выбор оптимальных коэффициентов заполнения представляет собой задачу, от решения которой во многом зависит экономичность проектируемого трансформатора. Обычно удельные нагрузки $s$ и $B$ выбирают на основании данных опыта (табл. 32). Предельная величина индукции определяется насыщением и нагревом стали, а также допустимым намагничивающим током. Предельная плотность тока $s$ определяется условиями нагрева, величиной желаемого к. п. д. и механическими напряжениями при внезапном коротком замыкании. В данном параграфе показано, что можно выбрать $s$ и $B$ так, чтобы получились наперед заданные потери и напряжение короткого замыкания и при этом был обеспечен минимум расхода материалов.

Коэффициенты заполнения могут быть правильно выбраны на основании данных опыта: $\varphi_{Cu}$ по рис. (151) [15], $\varphi_{Fe}$ по табл. 34.

При условиях постоянства $s$, $B$, $\varphi_{Cu}$ и $\varphi_{Fe}$ диаметр будет функцией произведения $\alpha\lambda$. Можно найти такие значения $\alpha$ и $\lambda$, при которых стоимость активных материалов будет минимальная. Обозначим стоимость единицы веса обмотки через $m_{Cu}$** и стоимость единицы веса сердечника через $m_{Fe}$. Тогда стоимость всего магнитопровода при равных сечениях стержней и ярем будет

$$M_{Fe} = m_{Fe} m \frac{\pi}{4} \gamma_{Fe}\varphi_{Fe} D^2 \left(l_s + k\frac{l_0}{2} + bD\right) = K_{Fe} D^3 (\alpha + k\lambda + b), \quad (3)$$

где

$$K_{Fe} = m_{Fe} m \frac{\pi}{4} \gamma_{Fe}\varphi_{Fe}; \quad k = \frac{2}{3}(m+1); \quad b = 1{,}8\,***.$$

* Впервые подобная задача рассмотрена Н. И. Булгаковым [15], но в несколько другом аспекте.

** В стоимость единицы веса обмотки и сердечника включаются стоимость изоляции и стоимость изготовления.

*** $b = 1{,}8$ вместо 2 для учета уменьшения веса в углах ярма.



Стоимость обмоток

$$M_{Cu} = m_{Cu} m\pi\gamma_{Cu}\varphi_{Cu}\left(D + \frac{l_0}{2}\right) l_s \frac{l_0}{2} = K_{Cu} D^3 (1+\lambda)\alpha\lambda, \quad (4)$$

где

$$K_{Cu} = m_{Cu} m\pi\gamma_{Cu}\varphi_{Cu}.$$

Суммарная стоимость активных материалов

$$M_m = M_{Fe} + M_{Cu} = K_{Fe} D^3 [(\alpha + k\lambda + b) + v(1+\lambda)\alpha\lambda], \quad (5)$$

где

$$v = \frac{K_{Cu}}{K_{Fe}} = \frac{4m_{Cu}\gamma_{Cu}\varphi_{Cu}}{m_{Fe}\lambda_{Fe}\varphi_{Fe}}.$$

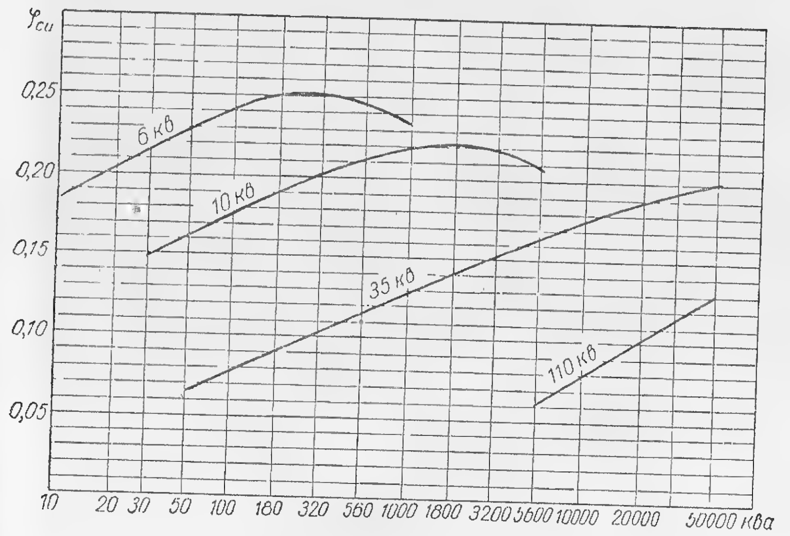



Рис. 151. Коэффициенты заполнения окна.

Подставляя $D^3$ из (1), получаем

$$M_m = K_{Fe} a_1^{-\frac{3}{4}} P^{\frac{3}{4}} (sB)^{-\frac{3}{4}} (\alpha\lambda)^{-\frac{3}{4}} [\alpha + k\lambda + b + v\alpha\lambda(1+\lambda)], \quad (6)$$

где

$$a_1 = m\frac{\pi^2}{8}\sqrt{2}\, f\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}. \quad (7)$$

Как видно, при данных условиях $M_m$ будет иметь минимум при коэффициентах $\alpha$ и $\lambda$, удовлетворяющих уравнениям:

$$1)\ \frac{\partial M_m}{\partial\alpha} = 0; \quad 2)\ \frac{\partial M_m}{\partial\lambda} = 0.$$

Из первого уравнения

$$\alpha = 3\frac{k\lambda + b}{1 + v\lambda(1+\lambda)}. \quad (8)$$

Из второго уравнения

$$\alpha = \frac{3b - k\lambda}{v\lambda + 5v\lambda^2 - 3}. \quad (9)$$

Приравняв, получаем

$$4kv\lambda^3 + \lambda^2(kv + 3bv) - 2k\lambda - 3b = 0. \quad (10)$$

Таким образом, решения уравнений (8) и (10) дают оптимальные геометрические отношения, соответствующие минимальной стоимости активных материалов при заданных удельных нагрузках и коэффициентах заполнения.

Величина $v$ зависит от типа трансформатора, рабочего напряжения и соотношения цен меди и стали.

При $\frac{m_{Cu}}{m_{Fe}} \approx 4; \quad \frac{\gamma_{Cu}}{\gamma_{Fe}} \approx 1{,}14; \quad \frac{\varphi_{Cu}}{\varphi_{Fe}} \approx 0{,}2 \quad v = 4.$

При низких напряжениях $v$ возрастает, при высоких напряжениях вследствие уменьшения $\varphi_{Cu}$ $v$ уменьшается.

Решение задачи по формулам (8) и (10) сведено в табл. 29.

*Таблица 29*

**Оптимальные геометрические соотношения трансформаторов**

| Трансформаторы | $v=8$ | | | $v=4$ | | | $v=2$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\alpha$ | $\lambda$ | $\alpha\lambda$ | $\alpha$ | $\lambda$ | $\alpha\lambda$ | $\alpha$ | $\lambda$ | $\alpha\lambda$ |
| Трехфазные ($m=3$) | 1,98 | 0,28 | 0,555 | 2,60 | 0,395 | 1,025 | 3,7 | 0,545 | 2,02 |
| Однофазные ($m=2$) | 1,78 | 0,29 | 0,516 | 2,36 | 0,400 | 0,944 | 3,2 | 0,570 | 1,82 |

Практически отношения $\alpha$ и $\lambda$ находятся в пределах $1{,}5 < \alpha < 4$; $0{,}35 < \lambda < 0{,}8$ (большие значения для высоковольтных трансформаторов). Рассмотрим, как изменяются основные соотношения в трехфазных трансформаторах минимальной стоимости при $v = 8$, $v = 4$, $v = 2$. Эти соотношения сведены в табл. 30.

*Таблица 30*

**Основные соотношения в трансформаторах**

| Основные соотношения | $v=8$ | $v=4$ | $v=2$ |
|---|---|---|---|
| Отношение длины витка к длине стержня $\frac{l_w}{l_s} = \frac{\pi(1+\lambda)}{\alpha}$ | 2,03 | 1,687 | 1,313 |
| Отношение веса ярем к весу стержней $\psi_j = \frac{8\lambda + 3b}{3\alpha}$ | 1,28 | 1,098 | 0,978 |
| Отношение стоимостей железа и меди $\psi = \frac{\alpha + k\lambda + b}{v\alpha\lambda(1+\lambda)}$ | 0,816 | 0,955 | 1,120 |
| Относительная стоимость активных материалов в условных единицах по (6) * $M_m \equiv (\alpha\lambda v)^{-3/4}[\alpha + k\lambda + b + v\alpha\lambda(1+\lambda)]$ | 3,27 | 4,20 | 4,30 |
| Отношение высоты окна к ширине $\frac{l_s}{l_0} = \frac{\alpha}{2\lambda}$ | 3,53 | 3,30 | 3,40 |

---

* При этом принято, что в формуле для $M_m$ все величины, кроме $\varphi_{Cu}$, постоянны, и $v$ изменяется пропорционально $\varphi_{Cu}$.



Как видно из табл. 30, законы Видмара ($\psi = 1$, $\psi_j = 1$) соответствуют только частному случаю.

Исследование влияния на стоимость материалов при изменении $\alpha$ и $\lambda$ показывает, что отступление от этих величин на 100% в ту или другую сторону приводит к увеличению стоимости не более чем на 10%. Для построенных трансформаторов произведение $\alpha\lambda\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}$ изменяется мало (табл. 30), так как при уменьшении коэффициента заполнения окна произведение $\alpha\lambda$ возрастает. Это дает основания представить ориентировочную формулу для определения диаметра в виде

$$D = C_т \sqrt[4]{P}, \tag{11}$$

где

$$C_т = \left(m \frac{\pi^2}{8} \sqrt{2}\, fsB\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}\alpha\lambda\right)^{-\frac{1}{4}}. \tag{12}$$

Если взять в среднем $s = 350\ а/см^2$, $B = 1{,}4 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2$, $\alpha\lambda = 1$, $\varphi_{Cu} = 0{,}2$, $\varphi_{Fe} = 0{,}75$, то для трехфазных трансформаторов ($m = 3$) $C_т \approx 0{,}85$, а для однофазных ($m = 2$) $C_т \approx 0{,}93$.

Значения $C_т$ для построенных трансформаторов изменяются в узких пределах (см. табл. 42), и, следовательно, выражение (11) может быть использовано для предварительного определения диаметра. Приняв найденные геометрические соотношения в качестве исходных, при определении размеров трансформатора могут быть четыре случая, рассмотренных ниже.

Потери и напряжение короткого замыкания не заданы. В этом случае можно задаться определенными величинами $s$, $B$, $\varphi_{Cu}$, $\varphi_{Fe}$, например, на основании данных опыта и по (11) определить диаметр стержня $D$, затем длину стержня $l_s = \alpha D$ и ширину окна $l_0 = 2\lambda D$.

Потери в меди и в стали будут равны

$$p_{Cu} = s^2\rho V_{Cu} = s^2\rho\, D^3 v_{Cu}; \tag{13}$$

$$p_{Fe} = B^2 c_{Fe} V_{Fe} = B^2 c_{Fe} D^3 v_{Fe}, \tag{14}$$

где

$$v_{Cu} = \alpha\lambda(1+\lambda)\, m\pi\varphi_{Cu} \quad и \quad v_{Fe} = m\frac{\pi}{4}\varphi_{Fe}(\alpha + k\lambda + b).$$

Отношение $\frac{v_{Fe}}{v_{Cu}}$ равно отношению общих объемов железа и меди в трансформаторах. Обычно это отношение близко к обратной величине отношения цен меди и стали, т. е. лежит в пределах 5—7.

Реактивное напряжение короткого замыкания в относительных единицах получится равным

$$u_р = \frac{\sqrt{2}\mu_0 Iwl_w\delta''}{\Phi l_s} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 Iw\pi(1+\lambda)\delta''}{\Phi\alpha} = 2\sqrt{2}\mu_0\lambda(1+\lambda)\frac{\varphi_{Cu}}{\varphi_{Fe}}\delta''\frac{s}{B}, \tag{15}$$

где

$$\delta'' = \delta' k_R \frac{l_s}{H}; \quad Iw = \frac{1}{4} l_0 l_s \cdot s\varphi_{Cu}; \quad \Phi = \frac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe} B.$$

Приведенный канал рассеяния (см. рис. 153, *а*; табл. 24)

$$\delta' = \delta'_{12} + \frac{1}{3}(b_1 + b_2) \approx \delta''\,^*. \tag{15a}$$

Ширина окна $l_0 = 2\lambda D$ или $l_0 = 2\lambda C_т \sqrt[4]{P}$.

---

* При наличии продольных каналов в обмотке (рис. 153, *б*) формула (15a) приближенно справедлива при $\delta'_{12} = \delta_{12} + \frac{1}{4}(\delta_1 + \delta_2)$.

Ширина обмоток

$$b_1 + b_2 \approx 0{,}5 l_0 - \delta_{12} - \Delta_i \approx 0{,}5 l_0 \varphi_B,$$

где $\varphi_B$ — коэффициент заполнения меди по ширине

$$\varphi_B \approx \sqrt{\varphi_{Cu}} \quad (\varphi_{Cu} \text{ по рис. } 151);$$

$\Delta_i$ — толщина изоляционных промежутков.

Следовательно,

$$\delta' = \delta'_{12} + \frac{1}{3}\lambda C_{т} \sqrt[4]{P} \approx \delta''.$$

Таким образом, при выбранных значениях $s$, $B$ и $\lambda$ величина $u_p$ получится вполне определенной.

П о т е р и  и $u_p$ з а д а н ы. Если, как обычно, величины $p_{Cu}$, $p_{Fe}$ и $u_p$ заданы, то из (13), (14) и (15) можно определить $s$ и $B$, а также другие величины, чтобы удовлетворить этим требованиям.

Требование определенного значения $u_p$ возможно осуществить согласно (15) путем правильного выбора $\delta''$, отношений $\frac{s}{B}$ и $\lambda$ при данных величинах коэффициентов заполнения $\varphi_{Cu}$ и $\varphi_{Fe}$.

Ориентировочная ширина обмоток, обеспечивающая заданное отношение составляющих напряжения короткого замыкания, может быть получена следующим образом. Если взять отношение реактивной составляющей по (15) и активной составляющей

$$u_a = \frac{2I\rho l_w w}{\pi\sqrt{2} q f \Phi w}, \tag{16}$$

где $qw = b_{Cu} H_{Cu}$ — сечение меди одной обмотки, то получим

$$\frac{u_p}{u_a} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 \delta' \pi \sqrt{2} f b_{Cu} \varphi_H k_R}{2\rho} = \frac{2\pi\mu_0 f \delta' (b_1 + b_2) \varphi'_{Cu} k_R}{4\rho}, \tag{17}$$

где $\varphi'_{Cu} = \varphi_H \varphi_b$ — коэффициент заполнения медью пространства, занимаемого обмоткой.

Подставив значение $\delta'$ по (15а), получим суммарную ширину двух обмоток

$$b_1 + b_2 = \sqrt{\frac{6{,}55}{k_R \varphi'_{Cu}} \frac{50}{f} \frac{u_p}{u_a} + (1{,}5\delta'_{12})^2} - 1{,}5\delta'_{12}. \tag{18}$$

Коэффициент заполнения $\varphi'_{Cu}$ для серийных трансформаторов лежит в пределах 0,25 — 0,4 в зависимости от $\varphi_{Cu}$.

Расчетный зазор $\delta'$ может быть, следовательно, определен с достаточным приближением независимо от размеров магнитопровода

$$\delta' = \frac{1}{3}(b_1 + b_2) + \delta'_{12},$$

где $\delta'_{12}$ — в соответствии с табл. 24 и стр. 329.

Найдя ширину обмоток и выбрав по условиям диэлектрической прочности изоляционные расстояния $\delta_{02}$, $\delta_{12}$ и $\delta_{11}$ (табл. 24), получим ш и р и н у  о к н а (рис. 140, *б*)

$$l_0 = 2(b_1 + b_2 + \delta_{12} + \delta_{02}) + \delta_{11} + \delta_1 + \delta_2. \tag{19}$$

При отсутствии вертикального подразделения катушек $\delta_1 = \delta_2 = 0$. Выполнение заданного отношения $u_p/u_a$ требует по (18) определенной ширины меди, а так как изоляционные расстояния задачи условиями диэлектрической прочности, то получаем определенную ширину окна. Поэтому выбор основных размеров целесообразно начинать с выбора ширины окна.



О т н о ш е н и е $\frac{s}{B}$ может быть получено из (13) и (14) в виде

$$s = k_s B, \tag{20}$$

где

$$k_s = \sqrt{\xi \frac{c_{Fe}}{\rho} \frac{v_{Fe}}{v_{Cu}}}. \tag{21}$$

Подставляя в (13) значение $D$ из (1) и принимая во внимание (20) и (7), получаем

$$D = \left(\frac{P}{a_1 \alpha \lambda}\right)^{1/4} \frac{1}{s^{1/4} B^{1/4}}; \tag{22}$$

$$p_{Cu} = s^2 \rho v_{Cu} \left(\frac{P}{a_1 \alpha \lambda}\right)^{3/4} \frac{1}{s^{3/4} B^{3/4}} = \left(\frac{P}{a_1}\right)^{3/4} \rho \frac{v_{Cu}}{(\alpha\lambda)^{3/4}} k_s^{3/4} s^{1/2}. \tag{23}$$

Из уравнения (22)

$$s = \frac{p_{Cu}^2 (\alpha\lambda)_1^{3/2} a_1^{3/2}}{(\rho v_{Cu})^2 k_s^{3/2} P^{3/2}} = \left(\frac{\Sigma p}{P}\right)^2 \frac{P^{0,5} a_1^{3/2} \xi^{5/4} (\alpha\lambda)^{3/2}}{\rho^{5/4} v_{Cu}^{5/4} v_{Fe}^{3/4} c_{Fe}^{3/4} (1 + \xi)^2}; \tag{24}$$

$$B = \frac{s}{k_s} = \frac{p_{Cu}^2 (\alpha\lambda)^{3/2} a_1^{3/2}}{(\rho v_{Cu})^2 k_s^{5/2} P^{3/2}} = \left[\left(\frac{\Sigma p}{P}\right)^2 P^{1/2} \frac{a_1^{3/2} (\alpha\lambda)^{3/2}}{\rho^{3/4} v_{Cu}^{3/4} v_{Fe}^{5/4} c_{Fe}^{5/4}}\right] \frac{\xi^{3/4}}{(1 + \xi)^2}. \tag{25}$$

Величина $B$ не должна быть выше предельного значения по насыщению (для обычной стали $1{,}45 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*², для холоднокатаной стали $1{,}7 \times 10^{-4}$ *вб/см*²).

При заданной мощности и потерях чем выше получится значение $s$ по (24) и значение $B$ по (25), тем меньше будет расход меди и стали. Максимум $s$ при заданных величинах $P$, $\Sigma p$, $\xi$, $\rho$, $c_{Fe}$ определяется максимумом выражения (24), т. е. максимумом величины

$$F_s = \frac{(\alpha\lambda)^{3/2}}{v_{Cu}^{5/4} v_{Fe}^{3/4}}. \tag{26}$$

Подставляя $v_{Cu}$ и $v_{Fe}$ из (13) и (14) и решая систему уравнений

$$\frac{\partial F_s}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial F_s}{\partial \lambda} = 0,$$

находим

$$\alpha = \frac{k\lambda + b}{2} \approx 1{,}1; \quad \lambda = 0{,}15,$$

т. е. трансформатор, имеющий малый расход меди, будет иметь малую высоту и большой диаметр. Такая конструкция неприемлема как вследствие большого веса стали, так и по недопустимым механическим напряжениям в обмотке при коротких замыканиях.

Максимум $B$ получится при максимуме выражения (25) или выражения

$$F_B = \frac{(\alpha\lambda)^{3/2}}{v_{Cu}^{3/4} v_{Fe}^{5/4}}. \tag{27}$$

Решая систему

$$\frac{\partial F_B}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial F_B}{\partial \lambda} = 0,$$

получаем

$$\alpha = \frac{3}{2}(k\lambda + b) \approx 7; \quad \lambda = -\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{3b}{2k}} \approx 1{,}1,$$

т. е. трансформатор при минимуме расхода стали должен иметь большую высоту и малый диаметр. Такая конструкция также неприемлема как из-за большого расхода меди, так и по ряду других причин. Очевидно, что минимуму стоимости материалов соответствуют отношения $\alpha$ и $\lambda$, лежащие где-то посередине, т. е., как мы и получили выше, $\alpha \approx 3 \div 4$; $\lambda \approx 0{,}3 \div 0{,}5$.

Выразим мощность

$$P = m\pi \sqrt{2}\, f \Phi I w$$

через потери, геометрические размеры и их соотношения. Для этого подставим $Iw = S_{Cu} s$ и $\Phi = S_{Fe} B$. Плотность тока $s$ и индукцию $B$ выразим через потери по (13) и (14). Общие сечения меди $S_{Cu}$ и стали $S_{Fe}$ выразим через $D$, $\alpha$, $\lambda$, $\varphi_{Cu}$, $\varphi_{Fe}$:

$$S_{Cu} = \frac{l_0}{4} l_s \varphi_{Cu} = \frac{\alpha\lambda}{2} D^2 \varphi_{Cu}; \quad S_{Fe} = \frac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe}.$$

В результате получим

$$P = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} f D \sqrt{p_{Cu} p_{Fe}} \sqrt{\frac{\alpha\lambda}{(1+\lambda)(\alpha + k\lambda + b)}} \sqrt{\frac{\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}}{\rho c_{Fe}}}. \tag{28}$$

Находя из полученного выражения диаметр стержня

$$D = \frac{4}{\pi\sqrt{2} f} \frac{P}{\sqrt{p_{Cu} p_{Fe}}} \sqrt{\frac{(1+\lambda)(\alpha + k\lambda + b)}{\alpha\lambda}} \sqrt{\frac{\rho c_{Fe}}{\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}}} \tag{29}$$

и подставляя в выражение (5), получаем *стоимость активных материалов в зависимости от потерь*

$$M_m = k_1 \frac{P^3}{(p_{Cu} p_{Fe})^{3/2}} [\alpha + k\lambda + b + v(1+\lambda)\alpha\lambda] \left[\frac{(1+\lambda)(\alpha + k\lambda + b)}{\alpha\lambda}\right]^{3/2}, \tag{30}$$

где

$$k_1 = \left(\frac{4\sqrt{\rho c_{Fe}}}{\pi\sqrt{2} f \sqrt{\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}}}\right)^2 \cdot K_{Fe} \approx (7 \div 8) \cdot 10^{-6} \cdot m_{Fe} \text{ руб.} \tag{31}$$

Исследование (30) показывает, что п р и з а д а н н ы х п о т е р я х минимум $M_m$ получается при значениях $\alpha$ и $\lambda$, близких к полученным ранее.

При выбранных геометрических отношениях из (30) следует:

$$M_m p_{Fe}^3 \xi^{3/2} = \text{const}. \tag{30а}$$

Минимум действительной стоимости $M_д = M_m + k p_{Fe}(1+\xi)$, принимая во внимание (30а), получится при

$$\xi = \frac{1{,}5 M_m}{k p_{Fe}} = \frac{1{,}5\left(m_{Fe} + \frac{1}{\psi_1} m_{Cu}\right)}{k B^2 k_{Fe}}. \tag{30б}$$

(При «идеальных» условиях, гл. 2, $m_{Fe} = \frac{m_{Cu}}{\psi_1} = kB^2 k_{Fe}$ и $\xi = 3$.)

Выражение (29) для диаметра можно привести к виду

$$D = \frac{C(1+\xi)}{\Sigma p\,\% \sqrt{\xi}} \left(\frac{50}{f}\right) \sqrt{\frac{(1+\lambda)(\alpha + k\lambda + b)}{\alpha\lambda\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}}}, \tag{32}$$

где

$$C = \frac{4 \cdot 100}{\pi\sqrt{2}\, 50} \sqrt{\rho c_{Fe}} = 2{,}57 \sqrt{p_{10}}.$$



(Для меди $\rho = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *ом · см*, для стали Э43 $p_{10} = 1{,}5$ *вт/кг*.) Произведение $\alpha\lambda\varphi_{Cu}$ стремится к постоянной величине. Вводя $\alpha = 2{,}6$; $\lambda = 0{,}4$ и средние значения $\varphi_{Cu} = 0{,}2$; $\varphi_{Fe} = 0{,}75$, получим при медной обмотке

$$D = \frac{16{,}3\sqrt{p_{10}}}{\Sigma p\,\%} \frac{50}{f} \frac{1+\xi}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{0{,}2 \cdot 0{,}75}{\varphi_{Cu}\varphi_{Fe}}}\, g', \tag{33}$$

где

$$g' = \sqrt{\frac{1+\lambda}{1{,}4} \frac{2{,}6 \cdot 0{,}4}{\alpha\lambda} \left(\frac{\alpha + k\lambda + 1{,}8}{2{,}6 + k0{,}4 + 1{,}8}\right)} \approx 1. \tag{33а}$$

При употреблении алюминия (33) увеличивается в отношении $\sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} = 1{,}29$.

Как видно, диаметр обратно пропорционален принятым относительным потерям и зависит от отношения потерь $\xi$, а также от коэффициентов заполнения и в малой степени — от геометрических соотношений $\alpha$ и $\lambda$, если последние мало отклоняются от оптимальных пределов.

Плотность тока по (24) можно представить через относительные потери в виде

$$s = 20(\Sigma p\%)^2 \frac{\xi^{5/4}}{(1+\xi)^2 p_{10}^{3/4}} P^{0,5} \left(\frac{f}{50}\right)^{3/2} N_s \text{ а/см}^2, \tag{34}$$

где $P$ — *ква*;

$$N_s = \left(\frac{\alpha}{2{,}6} \frac{\lambda}{0{,}4} \frac{\varphi_{Cu}}{0{,}2}\right)^{1/4} \left(\frac{\varphi_{Fe}}{0{,}75}\right)^{3/4} \left(\frac{1{,}4}{1+\lambda}\right)^{5/4} \left(\frac{2{,}6 + k\,0{,}4 + 1{,}8}{\alpha + k\lambda + 1{,}8}\right)^{3/4}. \tag{34а}$$

При «оптимальных» значениях $\alpha = 2{,}6$; $\lambda = 0{,}4$; $\varphi_{Cu} = 0{,}2$; $\varphi_{Fe} = 0{,}75$; $N_s = 1$.

Из полученной формулы можно видеть, что плотность тока при заданных потерях и их распределении определяется только геометрическими соотношениями $\alpha$ и $\lambda$ и коэффициентами заполнения. Величина $N_s$ для серийных и соразмерных трансформаторов мало отличается от единицы. При $\Sigma p = \text{const}$ по (34) $s_{max}$ получится при $\xi = 1{,}67$.

Для того чтобы была обеспечена возможность получения определенной величины напряжения короткого замыкания, необходимо в соответствии с (15) и (20), чтобы величины $\alpha$ и $\lambda$ удовлетворяли равенству

$$u_р = \sqrt{2}\, \mu_0 \delta'' \sqrt{\xi \frac{\varphi_{Cu}}{\varphi_{Fe}} \frac{c_{Fe}}{\rho} \frac{\lambda(1+\lambda)(\alpha + k\lambda + b)}{\alpha}}. \tag{35}$$

При этом, как показано выше, $\delta''$ задано, если заданы составляющие $u_к$, $u_р$ и $u_а$.

При $\alpha = 2{,}6$; $\lambda = 0{,}4$ и при $\frac{c_{Fe}}{\rho} = 52 \cdot 10^{10}$ для стали Э-43 получим

$$u_р = 1{,}4 \cdot 10^{-2} \delta'' \sqrt{\xi \frac{\varphi_{Cu}}{\varphi_{Fe}}}. \tag{36}$$

При других значениях $\alpha$ и $\lambda$

$$u_р = 1{,}4 \cdot 10^{-2} \delta'' \sqrt{\xi \frac{\varphi_{Cu}}{\varphi_{Fe}} N}, \tag{37}$$

где

$$N = \left[\frac{\lambda}{0{,}4} \left(\frac{1+\lambda}{1{,}4}\right) \left(\frac{\alpha}{2{,}6} + \frac{k\lambda}{k0{,}4} + 1{,}8\right)\right]^{1/2} \left(\frac{\alpha}{2{,}6}\right)^{-1/2}. \tag{38}$$

Значение $N$ близко к единице.

Размеры трансформатора можно определять теперь в следующем порядке:

1. Определить ориентировочное значение диаметра стержня $D$ по (11) или (33) при $g' = 1$.

2. Определить по (18) ширину $b_1 + b_2$ и далее по (19) ширину окна $l_0$, расчетный канал $\delta''$ по (15a) и ориентировочное значение $\lambda = \frac{l_0}{2D}$.

3. Определить по (37) необходимое значение коэффициента $N$ при заданных $u_p$, $\xi$ и выбранной по рис. 151 и табл. 34 величине $\frac{\varphi_{Cu}}{\varphi_{Fe}}$.

4. Выбрать по (38) отношения $\lambda$ и $\alpha$, при которых получится желаемое значение $N$ (в качестве величины $\lambda$ можно принять сначала найденную выше и подбирать величину $\alpha$).

5. При полученных значениях $\alpha$ и $\lambda$ определить по (33а) величину $g'$, уточненный диаметр стержня $D$, длину $l_s = \alpha D$ и сечение $S = \frac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe}$, где $\varphi_{Fe}$ по табл. 34. Ширина окна $l_0 = 2\lambda D$ должна быть близка к определенной выше.

6. Плотность тока $s$ получится по (34) при данном значении $N_s$. Значения плотности тока не должны сильно отклоняться от приведенных в табл. 32.

7. Индукция получится по (25) как

$$B = \frac{s}{k_s},$$

где

$$k_s = \sqrt{\xi \frac{c_{Fe}}{\rho} \frac{\varphi_{Fe}(1 + k\lambda + b)}{4\alpha\lambda(1 + \lambda)}}.$$

Ее величина должна быть в пределах, данных в табл. 32.

Можно сразу выбрать индукцию, предельную по насыщению. При этом, поскольку потери в стали $p_{Fe}$ заданы, получим трансформатор с минимальным весом магнитопровода. По (25) и (35) заданные значения $B$ и $u_p$ дают вполне определенные величины $\alpha$ и $\lambda$. Можно также выбрать и определенную величину плотности тока; при этом, поскольку потери в меди заданы, получим определенный вес меди и для обеспечения заданной величины $u_p$ по (15) необходимо выбрать определенную величину $\lambda$.

Выбрав величину $B$, получим магнитный поток $\Phi = SB$, напряжение на виток $e_w = 4{,}44 f\Phi$ и числа витков первичной и вторичной обмоток. Поскольку токи обмоток известны, при выбранной плотности тока получим сечения меди.

Далее производим уточненный расчет, т. е. выбор стандартной меди, размещение обмоток в окне с соблюдением изоляционных расстояний, уточнение сечения стержней и ярем, уточненный расчет потерь и напряжения короткого замыкания, проверку обмоток на нагрев и на механическую прочность.

Из уравнения (30) нельзя сделать вывод, что стоимость материалов уменьшается при приближении $\xi$ к единице. Изменение расхода активных материалов трансформатора при заданной сумме потерь в зависимости от их соотношения можно получить из (13) и (14).

Вес магнитопровода, пропорциональный $D^2 l_{Fe}$, равен

$$G_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{B^2 k_{Fe}} = \frac{\Sigma p}{(1 + \xi) B^2 k_{Fe}}, \tag{39}$$

где

$$k_{Fe} = \frac{c_{Fe}}{\gamma_{Fe}} = p_{10} \cdot 10^8.$$

Если бы при изменении $\xi$ индукцию $B$ можно было сохранить постоянной, то вес магнитопровода уменьшался бы с ростом $\xi$. Однако, если увеличивать $\xi$, например, больше 4 — 5 при $B = \text{const}$, то мы получим по формуле (39) недопустимо малые размеры магнитопровода и недопустимо большие величины напряжения короткого замыкания. Следовательно, мы должны уменьшать индукцию или делать трансформатор несоразмерным, увеличивая при этом вес магнитопровода.



Вес меди $\left(\text{при } k_{Cu} = \frac{\rho}{\gamma_{Cu}}\right)$

$$G_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{s^2 k_{Cu}} = \frac{\Sigma p \xi}{s^2 k_{Cu}(1 + \xi)}. \tag{40}$$

Плотность тока

$$s = \frac{p_{Cu}}{2mIwl_{w}\rho}. \tag{41}$$

Отсюда

$$G_{Cu} = \frac{2mIwl_{w}\rho(1 + \xi)}{k_{Cu}\Sigma p \xi}. \tag{42}$$

Так как с увеличением $\xi$ от единицы и выше по (32) диаметр стержня изменяется незначительно, то при постоянной индукции поток $Iwl_w$ также изменяется незначительно. Следовательно, вес меди уменьшается с ростом $\xi$. Однако при очень больших значениях $\xi$ для получения определенной величины напряжения короткого замыкания приходится увеличивать высоту стержня и уменьшать индукцию. При этом расход материалов снова возрастает.

З а д а н ы п о т е р и в м е д и и с т а л и, н а п р я ж е н и е к о р о т к о г о з а м ы к а н и я и у д е л ь н ы е н а г р у з к и. Этот случай может быть в условиях вариантных расчетов трансформаторов, когда исследуется влияние на экономичность трансформатора значений задаваемых потерь и их распределения, напряжения короткого замыкания и удельных нагрузок. Поскольку заданы потери в стали и индукция, вес магнитопровода получается вполне определенным

$$G_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{k_{Fe} B_s^2}.$$

Если индукция выбрана предельной по насыщению или нагреву, то при заданных потерях и для данного сорта стали вес стали получится минимальным. Вес меди (алюминия) также получится вполне определенным

$$G_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{k_{Cu} s^2}.$$

Если предельную индукцию выбрать относительно легко, то этого нельзя сказать в отношении плотности тока. Предельная плотность тока при заданных потерях определится только условиями нагрева и механическими напряжениями при коротком замыкании. Поэтому необходимо выбирать плотность тока на основании опыта построенных трансформаторов (табл. 42) или путем расчета ряда вариантов. Необходимо также, чтобы при полученных весах меди и стали трансформатор не только имел достаточную электрическую, термическую и механическую прочность, но и обеспечивал бы получение заданной величины напряжения короткого замыкания.

Определение основных размеров трансформатора целесообразно начать с ширины окна $l_0$ по (19). Ширина обмоток $(b_1 + b_2)$ определится по (18), ширина каналов и изоляционных расстояний по табл. 24, 38. Определив приведенный канал рассеяния по (15а) при заданных значениях $\varphi_{Cu}/\varphi_{Fe}$ и $s/B$, из (15) определим

$$\lambda = -0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + u_p \frac{B}{s\delta''} \frac{\varphi_{Fe}}{\varphi_{Cu}} \frac{1}{2\sqrt{2}\mu_0}}. \tag{43}$$

Диаметр стержня

$$D = \frac{l_0}{2\lambda}.$$

Сечение

$$S_{Fe} = \frac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe}.$$

Пусть, например, $u_p = 0{,}07$; $B = 1{,}45 \cdot 10^{-4}$ $вб/см^2$; $s = 450$ $а/см^2$; $\delta'' = 5$ $см$; $\varphi_{Fe} = 0{,}8$; $\varphi_{Cu} = 0{,}2$.

При этом

$$\lambda = -0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + \frac{0{,}07 \cdot 1{,}45 \cdot 10^{-4}}{450 \cdot 5}\,\frac{0{,}8}{0{,}2}\,\frac{1}{2\sqrt{2} \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8}}} \approx 0{,}365,$$

$$D = 1{,}37 l_0; \quad \Phi = BS_{Fe}.$$

Высота стержня получится вполне определенной, так как общий вес и объем магнитопровода известны из (39)

$$V_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{\gamma_{Fe}} = mS_{Fe}\left(l_s + k\frac{l_0}{2} + bD\right),$$

откуда

$$l_s = \frac{V_{Fe}}{mS_{Fe}} - k\frac{l_0}{2} - bD.$$

Необходимо, чтобы длина $l_s$ получилась достаточной для размещения обмотки в окне, т. е. чтобы коэффициент заполнения

$$\varphi_{Cu} = \frac{4Iw}{sl_s l_0}, \quad \text{где } Iw = \frac{P}{m\pi\sqrt{2}f\Phi},$$

был в пределах, указанных практикой современного трансформаторостроения (рис. 151).

Окончательная возможность осуществления данного варианта устанавливается в результате уточненного расчета размещения обмотки в окне с соблюдением всех изоляционных расстояний и каналов охлаждения, уточненного расчета напряжения короткого замыкания, проверки обмотки на нагрев и механическую прочность при коротком замыкании.

З а д а н ы   п о т е р и   в   м е д и   и   с т а л и,   н а п р я ж е н и е   к о р о т к о г о   з а м ы к а н и я   и   и н д у к ц и я. Стоимость активных материалов трансформатора равна

$$M_m = M_{Fe} + M_{Cu} = m_{Fe}\left(G_{Fe} + \frac{m_{Cu}}{m_{Fe}}G_{Cu}\right) \tag{44}$$

или

$$M_m = m_{Cu}\left(G_{Cu} + G_{Fe}\frac{m_{Fe}}{m_{Cu}}\right).$$

Минимум стоимости получится, следовательно, в том случае, когда «приведенный» вес активных материалов $G_{Fe} + \frac{m_{Cu}}{m_{Fe}}G_{Cu}$ или $G_{Cu} + G_{Fe}\frac{m_{Fe}}{m_{Cu}}$ будет минимальным. При заданных потерях в стали $p_{Fe}$ чем выше индукция, тем меньше вес магнитопровода

$$G_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{k_{Fe}B^2}. \tag{45}$$

Таким образом, исходим из максимально допустимой по насыщению индукции $B$.

При этом задача о минимуме стоимости активных материалов состоит в следующем. *При заданных потерях в стали и заданном (минимальном) весе магнитопровода надо отыскать такие его сечения и длины, чтобы при заданных потерях в меди вес меди получился минимальным при напряжении короткого замыкания, равном заданному.* Если при этом удовлетворяются требования нагрева и механической прочности, то можно считать найденное решение близким к оптимальному. Ниже показано, что эта задача разрешима т о л ь к о   д л я   о п р е д е л е н н ы х   з н а ч е н и й суммы и отношения потерь. При увеличении $\xi$ выше определенных значений приходится уменьшать индукцию. При этом вес магнитопровода растет.



Решение этой задачи возможно получить из основных уравнений для мощности, напряжения рассеяния и потерь

$$P = m\pi\sqrt{2}fIw\Phi; \tag{46}$$

$$u_p = \frac{\mu_0 \sqrt{2}\, Iwl_w\delta' k_R}{\Phi H}; \tag{47}$$

$$p_{Cu} = 2mIws\rho l_w; \tag{48}$$

$$p_{Fe} = m\Phi c_{Fe}\, l'_{Fe}B, \tag{49}$$

где $l'_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{m}$ — длина магнитопровода на фазу (стержень).

Произведение м. д. с. на поток равно постоянной величине

$$Iw\Phi = \frac{P}{m\pi\sqrt{2}f} = a = \text{const}. \tag{50}$$

Вес меди

$$G_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{k_{Cu}s^2}. \tag{51}$$

Плотность тока из (48) равна

$$s = \frac{p_{Cu}}{2mIw\rho l_w}. \tag{52}$$

Подставляя значение $s$ в уравнение (51), получим

$$G_{Cu} = \frac{(2m)^2 (Iw)^2 \rho^2 l_w^2}{k_{Cu}p_{Cu}}. \tag{53}$$

Если б произведение м. д. с. на среднюю длину витка было постоянным, то

$$p_{Cu}G_{Cu} = \text{const},$$

и при заданных потерях вес меди был бы вполне определенным. Для уменьшения веса меди при заданных потерях, очевидно, надо сделать возможно меньшим произведением $Iwl_w$, которое зависит от величины потока, так как

$$Iw = \frac{a}{\Phi}, \tag{54}$$

где $a$ — по уравнению (50).

Средняя длина витка при выбранной индукции также является функцией потока. Действительно,

$$l_w = \pi\left(D + \frac{l_0}{2}\right);$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}}\frac{\Phi}{B}} \tag{55}$$

и

$$l_w = \pi\left(\sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}}\frac{\Phi}{B}} + \frac{l_0}{2}\right). \tag{56}$$

Таким образом,

$$Iwl_w = \frac{a\pi}{\Phi}\left(\sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}}\frac{\Phi}{B}} + \frac{l_0}{2}\right) = a\pi\left(\sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}}\frac{1}{B\Phi}} + \frac{l_0}{2\Phi}\right). \tag{57}$$

Отсюда следует вывод, что расход меди при заданных потерях будет тем меньше, чем больше выбрана величина потока. Но увеличение магнитного потока приводит к уменьшению м. д. с. и изменению относительной величины напряжения короткого замыкания. Очевидно, максимально возможная величина потока, а следовательно, минимальная затрата меди при $u_p = \text{const}$ определится из (47) условием

$$\frac{Iw}{\Phi}\,\frac{l_w k_R}{H}=\frac{u_\text{р}}{\mu_0\sqrt{2}\,\delta'}. \qquad (58)$$

Величина $\delta'$, как мы видели выше, определяется условиями электрической прочности и заданным отношением $\frac{u_\text{р}}{u_\text{а}}$. Так как

$$a=Iw\Phi=\frac{P}{m\pi\sqrt{2}\,f},$$

то

$$\frac{a}{\Phi^2}\,\frac{k_R l_w}{H}=\frac{u_\text{р}}{\mu_0\sqrt{2}\,\delta'} \qquad (59)$$

или

$$\frac{l_s}{l_w}=\frac{\mu_0\sqrt{2}\,a\delta''}{\Phi^2 u_\text{р}}, \qquad (60)$$

где

$$\delta''=\delta' k_R\frac{l_s}{H}.$$

Длина стержня $l_s$ определится из уравнения потерь

$$G_{\text{Fe}}=\frac{p_{\text{Fe}}}{k_{\text{Fe}}B^2}=m\left[l_s+k\frac{l_0}{2}+bD\right]\frac{\Phi}{B}\gamma_{\text{Fe}},$$

так как $l_0$ известна из (19).

Отсюда, принимая во внимание (59), получим

$$l_s=\frac{p_{\text{Fe}}}{mk_{\text{Fe}}B\Phi\gamma_{\text{Fe}}}-k\frac{l_0}{2}-b\sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,\frac{\Phi}{B}}. \qquad (61)$$

$$\frac{l_s}{l_w}=\frac{\dfrac{p_{\text{Fe}}}{mk_{\text{Fe}}B\Phi\varphi_{\text{Fe}}}-k\dfrac{l_0}{2}-b\sqrt{\dfrac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,\dfrac{\Phi}{B}}}{\pi\left(\sqrt{\dfrac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,\dfrac{\Phi}{B}}+\dfrac{l_0}{2}\right)}. \qquad (62)$$

Приравнивая правые части уравнений (60) и (62), получим уравнение для определения максимально возможного потока трансформатора

$$\frac{\mu_0\sqrt{2}\,\delta'' a\pi}{\Phi^2 u_\text{р}}=\frac{\dfrac{p_{\text{Fe}}}{mk_{\text{Fe}}B\Phi\varphi_{\text{Fe}}}-k\dfrac{l_0}{2}-b\sqrt{\dfrac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,\dfrac{\Phi}{B}}}{\left(\sqrt{\dfrac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,\dfrac{\Phi}{B}}+\dfrac{l_0}{2}\right)}. \qquad (63)$$

Определение $\Phi$ из этого уравнения можно упростить, если ввести некоторое условное значение потока

$$\Phi_1=\sqrt{\frac{\mu_0\sqrt{2}\,\delta'' a\pi}{2u_\text{р}}}. \qquad (64)$$

Сравнивая это выражение с выражением для потока из (60)

$$\Phi=\sqrt{\frac{\mu_0\sqrt{2}\,\delta'' a}{u_\text{р}}\,\frac{l_w}{l_s}}, \qquad (65)$$

видим, что условный поток есть поток при

$$\frac{l_w}{l_s}=\frac{\pi}{2}=1{,}57.$$



При этом условный диаметр магнитопровода

$$D_1=\sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,\frac{\Phi_1}{B}}. \qquad (66)$$

Так как

$$\frac{p_{\text{Fe}}}{mk_{\text{Fe}}B\Phi\gamma_{\text{Fe}}}=l'_{\text{Fe}}, \qquad (66a)$$

то из (63) получим

$$\left(\frac{\Phi_1}{\Phi}\right)^2=\frac{\dfrac{l'_{\text{Fe}_1}}{l_0}\,\dfrac{\Phi_1}{\Phi}-\dfrac{k}{2}-b\dfrac{D_1}{l_0}\left(\dfrac{\Phi}{\Phi_1}\right)^{0,5}}{2\dfrac{D_1}{l_0}\left(\dfrac{\Phi}{\Phi_1}\right)^{0,5}+1}. \qquad (67)$$

Обозначив

$$\frac{\Phi}{\Phi_1}=x;\qquad \frac{l_0}{2D_1}=\lambda_1;\qquad \frac{l'_{\text{Fe}_1}}{D_1}=c_1, \qquad (68)$$

получим уравнение (63) в виде

$$\frac{2+bx^2}{x^{0,5}}+\frac{2\lambda_1\left(\frac{k}{2}x^2+1\right)}{x}=c_1. \qquad (69)$$

Величина $x=\frac{\Phi}{\Phi_1}$ может быть определена путем графического построения уравнения (69) для различных значений $\lambda_1$. Каждому значению $c_1$ удовлетворяют два значения $x$ в области $x<1$ и $x>1$. Согласно уравнению (57), оптимальной будет большая величина $x$, т. е. в области $x>1$.

Определение размеров трансформатора по данному методу может быть произведено в следующем порядке:

1. Определяем ширину обмоток $(b_1+b_2)$ по уравнению (18).
2. Находим ширину окна (рис. 140,б и рис. 153)

$$l_0=2\left[b_1+b_2+\delta_{12}+\delta_{02}\right]+\delta_{11}+\delta_1+\delta_2$$

и приведенную ширину канала рассеяния

$$\delta''=\left(\frac{b_1+b_2}{3}+\delta'_{12}\right)k_R\frac{l_s}{H}.$$

При $\delta_1=\delta_2=0$ $\delta'_{12}=\delta_{12}$; произведение $k_R\frac{l_s}{H}$ близко к единице, и можно вначале принять $\delta''=\delta'$.

3. Определяем $\Phi_1$, $D_1$, $\lambda_1$ и $c_1$ по формулам (64), (66), (68). Величина $B$ выбирается максимально допустимой по условиям насыщения.
4. По табл. 31 определяем $x$, а затем и $\Phi=\Phi_1 x$.
5. Зная поток, получаем действительные значения сечения и диаметра сердечника

$$S_{\text{Fe}}=\frac{\Phi}{B}\quad\text{и}\quad D=\sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{\text{Fe}}}\,S_{\text{Fe}}}.$$

Коэффициент заполнения сердечника выбираем по табл. 34.

6. М. д. с. одной обмотки

$$Iw=\frac{a}{\Phi}=\frac{P}{m\pi\sqrt{2}\,f\Phi}.$$

7. При известной ширине окна находим среднюю длину витка

$$l_w=\pi(D+0{,}5l_0).$$

*Таблица 31*

**Значения $c_1$**

| $x$ \ $\lambda_1$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4,266 | 4,732 | 5,198 | 5,664 | 6,13 |
| 1,2 | 4,686 | 5,172 | 5,658 | 6,144 | 6,63 |
| 1,4 | 5,215 | 5,73 | 6,245 | 6,76 | 7,275 |
| 1,6 | 5,75 | 6,3 | 6,85 | 7,4 | 7,95 |
| 1,8 | 6,441 | 7,032 | 7,623 | 8,214 | 8,8 |
| 2 | 7,132 | 7,764 | 8,396 | 9,028 | 9,66 |

8. По уравнению (52) получаем среднюю плотность тока

$$s = \frac{p_{Cu}}{2mIw\rho l_w}.$$

Найденная плотность тока является максимально возможной при заданных потерях и заданном напряжении короткого замыкания и требует только проверки на допустимый перегрев обмотки и механическую прочность.

9. Числа витков обмоток определяются заданным напряжением

$$w_1 = \frac{U_1}{\pi \sqrt{2}\, \Phi f} \quad \text{и} \quad w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1}.$$

10. Сечения меди обмоток

$$q_1 = \frac{I_1}{s} \quad \text{и} \quad q_2 = \frac{I_2}{s}.$$

Сечения уточняются затем после выбора сортовой меди.

В дальнейшем приступаем к выбору типа обмоток, их размещению и уточнению осевых и радиальных размеров, а также уточнению размеров магнитопровода. При этом длина стержня и высота обмотки уточняются таким образом, чтобы получилась точно требуемая величина напряжения короткого замыкания, а общее сечение меди обмотки получилось бы достаточным с точки зрения механических напряжений при внезапном коротком замыкании.

Проверка на механическую прочность может быть произведена по формуле

$$\sigma_R = \frac{F_R}{2\pi S_{Cu}}, \tag{70}$$

где $\sigma_R$ — среднее напряжение. Обычно допускают не выше 600 *кг/см²*;

$F_R$ — радиальная сила, *кг* (по § 9-4);

$S_{Cu}$ — полное сечение меди обмотки

$$S_{Cu} = \frac{Iw}{s}.$$

## Общие выводы по методике определения экономических размеров в трансформаторах

1. Существуют экономические соотношения высоты стержня к диаметру $\alpha = \alpha_{э_1}$ и половины ширины окна к диаметру $\lambda = \lambda_{э_1}$, при которых расход материалов при заданных удельных нагрузках и максимально возможных коэффициентах заполнения будет минимальным. Эти соотношения зависят от коэффициентов заполнения окна и стержня и лежат в пределах $1,5 < \alpha_{э_1} < 4$; $0,35 < \lambda_{э_1} < 0,8$.

При этом $\varphi_{Cu}\, \alpha_{э_1}\, \lambda_{э_1} \to \text{const}$.



Если заданы не удельные нагрузки, а потери и их распределение, а также напряжение короткого замыкания $u_к$, то экономические значения $\alpha_{э_2} = \lambda_{э_2}$ будут отличаться от $\alpha_{э_1}$ и $\lambda_{э_1}$, но при этом находятся в указанных выше пределах. Невозможно заранее с учетом всех налагаемых условий определить точно оптимальные отношения $\alpha$ и $\lambda$; можно только указать пределы, в которых следует искать наилучшие решения. При этом не существует одного наилучшего решения, а всегда несколько близких друг к другу, в которых различные преимущества и недостатки уравновешены.

2. Существует экономическое отношение потерь в меди и в стали, при котором трансформатор будет иметь минимальную отпускную стоимость и минимальную стоимость в эксплуатации. Это отношение для большинства трансформаторов находится в пределах $3 < \xi < 4$.

3. При выборе размеров целесообразно вначале определить ширину окна и величину приведенного канала рассеяния $\delta'$. Эти величины не зависят от диаметра, а определяются отношением реактивной и активной составляющей напряжения короткого замыкания и величиной нормализованных изоляционных расстояний.

Весьма большое влияние на стоимость и габариты трансформатора оказывает величина удельных потерь в стали $p_{10}$ и коэффициенты заполнения, формулы (32) и (34). При уменьшении $p_{10}$ или при увеличении коэффициента заполнения $\varphi_{Cu}$ в $x$ раз расход меди и стали при неизменных потерях уменьшается приблизительно в $x^{1,5}$ раз. Вопрос о повышении $\varphi_{Cu}$ связан с вопросом о возможности уменьшения изоляционных расстояний, а также с целесообразным выбором типа обмотки и ее размещением в окне.

5. Определение экономических потерь и их распределения относится к специальным задачам, связанным с экономикой электроснабжения (учет графика нагрузки, потерь в линии и пр.) и экономикой в производстве энергии и цветных металлов (снижение цен, дефицитность материалов и т. п.).

## 9-4. РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

### Электромагнитный расчет

Исходными данными для расчета являются: $P$ — номинальная мощность; $m$ — число фаз; $U_{л_1}$ и $U_{л_2}$ — номинальные линейные напряжения; $f$ — частота; режим работы.

Должны быть заданы или выбраны также: напряжение короткого замыкания, коэффициент полезного действия или потери, схема и группа соединений, система охлаждения, сорт стали и материал проводов (медь, алюминий).

При отсутствии задания ориентируются на ГОСТ. Величиной, во многом влияющей на конструкцию трансформатора, является не только сумма, но и отношение потерь короткого замыкания (в меди) к потерям холостого хода (в железе). Величина отношения потерь $\xi$ обычно выбирается из экономических соображений.

Из основного выражения для мощности

$$P = mUI \approx m\pi \sqrt{2}\, fBsS_{Fe}\, S_{Cu}$$

видно, что расход активных материалов при заданной мощности в значительной степени зависит от удельных нагрузок, которые должны удовлетворять требованиям электрического и теплового режима. При расчете в качестве исходной величины используется индукция в сердечнике $B$, которую можно выбрать согласно табл. 32.

*Таблица 32*

**Электромагнитные нагрузки в трансформаторах**

| Трансформаторы | $B$ (в *вб/м²*) | $s$ (в *а/мм²*) |
|---|---|---|
| Естественное масляное охлаждение, $P \leqslant 100$ *ква* | 1,1 — 1,35 | $\frac{3-4}{2,5-3,5}$ |
| Естественное масляное охлаждение, $P > 100$ *ква* | 1,35 — 1,45 | $\frac{3,5-4,5}{3-3,5}$ |
| Естественное воздушное охлаждение | 0,9 — 1,2 | 1,8 — 3,0 |

Примечания: 1) при применении холоднокатаной стали индукция увеличивается на 15—20 %;
2) плотность тока в числителе — для однослойных катушек, в знаменателе — для многослойных;
3) при заданных потерях в стали снижение индукции ниже рекомендованной приводит к перерасходу материала, повышение — к увеличению нагрева трансформатора и тока холостого хода;
4) при форсированном охлаждении плотности тока могут быть соответственно увеличены.

Предварительный расчет основных размеров обычно производят в такой последовательности:

1. Экономичность трансформатора во многом зависит от правильного выбора основных размеров: диаметра сердечника $D$, длины $l_s$ и ширины окна $l_0$.

Исходную величину $D$ при употреблении медных обмоток можно вычислить по полученным в § 9-3 формулам:

$$\text{а) } D = 16,3 \sqrt{p_{10}} \frac{1}{\Sigma p\%} \frac{1+\xi}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{0,2 \cdot 0,75}{\varphi_{Cu} \varphi_{Fe}}} g' \text{ см},$$

где $p_{10}$ — *вт/кг* при $B = 10\,000$ *гс* и $f = 50$ *гц* для данной марки стали; $g' \approx 1$; величины $_{Cu}$ и $\varphi_{Fe}$ согласно рис. 151 и табл. 34.

При алюминиевых обмотках $D$ увеличится в $\sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} = 1,29$;

$$\text{б) } D = C_T \sqrt[4]{P} \text{ см},$$

где $P$ — в *ва*.

Для серии ТМ $C_T = 0,83 - 0,9$; для однофазных трансформаторов $C_T = 0,93 - 1,00$; при холоднокатаной стали $C_T = 0,75 - 0,8$.

Полученную величину округляем с учетом выгодного раскроя листовой стали.

2. Сечение сердечника (см. рис. 155)

$$S_{Fe} = \frac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe},$$

где $\varphi_{Fe} = k_ф k_п$ — коэффициент заполнения площади круга железом сердечника, равен произведению коэффициентов формы сечения и



межлистовой изоляции (прокладок). Число ступеней $n$ и коэффициент формы выбираются в зависимости от мощности трансформатора (табл. 33). Продольные охлаждающие каналы в магнитопроводе выполняются шириной 0,6 — 0,8 *см*. Каждый продольный канал уменьшает коэффициент формы табл. 33 на 0,015. При применении поперечного канала шириной 1,2 *см* число продольных каналов уменьшают на единицу. В сухих трансформаторах выполняют при $D \geqslant 20$ *см* один продольный канал, при $D \geqslant 25$ *см* — два канала шириной по 2 *см*.

*Таблица 33*

**Коэффициент формы сечения стержня**

| Мощность на стержень $\frac{P}{m}$ (в *ква*) | 5—15 | 5—50 | 50—2000 | 2000—5000 | 5000—20 000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Число ступеней $n$ | 4 | 5 | 5—6 | 7 | 8—9 |
| Коэффициент формы $k_ф$ | 0,886 | 0,91 | 0,91—0,92 | 0,93 | 0,94—0,95 |
| Ориентировочный $D$ (в *см*) | 8—12 | 12—16 | 16—43 | 43—55 | 55—78 |
| Число каналов | — | — | 1—2 | 2—4 | 4—5 |

Коэффициент $k_п$, учитывающий межлистовую изоляцию, зависит от толщины листов и рода изоляции (табл. 34).

*Таблица 34*

**Коэффициент проклейки и полный коэффициент заполнения**

| Толщина стали | Бумага | | Лак | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 0,35 | 0,5 | 0,35 |
| $k_п$ | 0,875 | 0,85 | 0,92 | 0,9 |
| $k_ф k_п = \varphi_{Fe}$ | 0,775—0,822 | 0,753—0,798 | 0,815—0,865 | 0,797—0,846 |

3. Магнитный поток в сердечнике

$$\Phi = S_{Fe} B \text{ вб}.$$

Индукция выбирается по табл. 32.

4. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_р = \sqrt{u_к^2 - u_а^2}.$$

Напряжение короткого замыкания $u_к$ берется согласно задания. Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_а = \frac{p_к}{P} \text{ д. е. или } u_а = \frac{(1-\eta)\,\xi}{\eta\,(1+\xi)}.$$

5. Суммарная радиальная ширина двух обмоток $b_1 + b_2$ может быть ориентировочно взята по табл. 35 или приближенно найдена

по отношению реактивной и активной составляющих напряжения короткого замыкания

$$b_1 + b_2 = \sqrt{(1{,}5\,\delta_{12})^2 + \frac{6{,}55 u_p}{k_R \varphi'_{Cu} u_a}} - 1{,}5\delta_{12},$$

*Таблица 35*

**Радиальная ширина обмоток**

| Тип обмоток | Система охлаждения | $P$ (в *ква*) | $U$ (в *кв*) | $b_1$ (в *мм*) | $b_2$ (*мм*) |
|---|---|---|---|---|---|
| Концентрическая | Естественное масляное . . | 5—100 | 6,6—11 | 1,5—25 | 6—12 |
| | | 180—1800 | 6,6—11 | 30 —40 | 12—20 |
| | | 180—1800 | 38,5 | 30 —40 | 20—30 |
| | | 180—5600 | 38,5 | 40 —50 | 25—35 |
| | То же, с обдувом . . . . | 5600—31 500 | 121 | 70—120 | 25—50 |
| | Естественное воздушное . | 5—200 | 2 | 6—20 | 6—12 |
| Чередующаяся | Естественное масляное . . | 100—400 | — | 100—150 | |
| | | 500—2000 | | 150—250 | |
| | | 200—10 000 | | 250—400 | |

где $\delta_{12}$ — изоляционное рассеяние между обмотками *ВН* и *НН* (см. табл. 24);

$k_R$ — коэффициент Роговского, учитывающий удлинение пути потока рассеяния (для предварительного расчета берется $k_R = 0{,}9 - 0{,}95$);

$\varphi'_{Cu}$ — коэффициент заполнения медью пространства, занимаемого обмоткой. Для нормальных трансформаторов $\varphi'_{Cu} = 0{,}25 - 0{,}40$ и зависит в основном от числа каналов и витковой изоляции.

6. Ширина окна трансформатора

$$l_0 = 2\,(b_1 + b_2 + \delta_{12} + \delta_{02}) + \delta_{11}.$$

Величина изоляционных промежутков $\delta_{12}$, $\delta_{02}$, $\delta_{11}$ выбирается из табл. 24 по заданному напряжению.

7. Проверка на минимальный расход материала.

Приведенная ширина канала рассеяния

$$\delta'' = \delta' k_R \frac{l_s}{H} \approx \delta' = \frac{1}{3}(b_1 + b_2) + \delta_{12}.$$

Условный поток

$$\Phi_1 = \sqrt{\frac{\mu_0 \sqrt{2}\,\delta'' a \pi}{2 u_p}} \; вб,$$

где

$$a = \frac{P}{m\pi\sqrt{2} f} \; вт\cdot сек; \quad \mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \; гн/см.$$



Условный диаметр стержня при $B$ в $\frac{вб}{см^2}$ и $\Phi_1$ в *вб*

$$D_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi \varphi_{Fe}} \frac{\Phi_1}{B}}.$$

Условное значение $\lambda = \lambda_1$

$$\lambda_1 = \frac{l_0}{2D_1}.$$

Постоянная $c_1 = \frac{l'_{Fe_1}}{D_1}$ и $x$ по табл. 31, $l'_{Fe_1}$ по (66а).

Поток

$$\Phi = x\Phi_1.$$

Сечение и диаметр стержня

$$S_{Fe} = \frac{\Phi}{B} \text{ и } D = \sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}} S_{Fe}}.$$

Значения диаметра и сечения стержня могут быть получены значительно больше выбранных по п. 1, и вследствие этого длина магнитопровода $l'_{Fe}$ и длина сердечника $l_s$ могут оказаться недостаточными для размещения меди в окне. Если это будет иметь место, необходимо соответственно уменьшить значение диаметра.

8. Длина магнитопровода на одну фазу

$$l'_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{\gamma_{Fe} k_{Fe} B^2 S_{Fe} m}.$$

При рассмотрении принята квадратичная зависимость удельных потерь от индукции, т. е.

$$p'_{Fe} = k_{Fe} B^2 \; вт/кг.$$

Коэффициент пропорциональности для стали Э43 толщиной 0,5 *мм* $k_{Fe} = p_{10} \cdot 10^8 = 1{,}5 \cdot 10^8$, для Э330 толщиной 0,35 *мм* $k_{Fe} = 0{,}94 \times 10^8$. Вместо произведения $k_{Fe}B^2$ можно подставить в формулу удельные потери, соответствующие выбранной индукции, согласно приложению II. Полученную длину $l'_{Fe}$ необходимо сравнить с оптимальной, равной

$$l'_{Fe} = D\,(\alpha + k\lambda + b),$$

где

$$\alpha = 1 \div 4; \; \lambda = 0{,}3 \div 0{,}8; \; k = \frac{2(m+1)}{3}; \; b = 1{,}8,$$

т. е.

$$l'_{Fe} = (3{,}5 \div 7{,}5)\,D.$$

При больших значениях $\xi$ и соответственно малых потерях $p_{Fe}$ может получиться недопустимо малая величина $l'_{Fe}$; при этом необходимо уменьшить индукцию.

9. Длина сердечника

$$l_s = l'_{Fe} - \left(bD + \frac{k}{2} l_0\right) = l'_{Fe} - \left(1{,}8D + \frac{m+1}{3} l_0\right).$$

Длина сердечника должна получиться согласно сказанному выше в пределах $(1-4)D$, желательно $(2{,}5-3)D$. Если $l_s$ получается малой, необходимо уменьшить $B$ или $D$; если большой, то надо увеличить диаметр стержня.

10. Высота обмотки

$$H = l_s - 2a_{01}.$$

Изоляционный промежуток $a_{01}$ — по табл. 24.

11. Средняя длина витка

$$l_w = \pi (D + 2\delta_{02} + b_1 + b_2 + \delta_{12}).$$

12. М. д. с. одной обмотки

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 = \frac{P}{m\pi \sqrt{2}\, f\Phi}.$$

13. Средняя плотность тока при заданных потерях в меди

$$s = \frac{p_{Cu}}{2mIwl_w \rho}.$$

Полученную плотность тока желательно проверить по табл. 32. Минимальный расход меди получится при максимально возможной плотности тока, которая не может быть с достаточной точностью определена заранее, так как определяется рядом условий (минимально допустимым общим сечением меди, исходя из механической прочности, условиями нагрева и охлаждения и пр.). Поэтому она может быть определена лишь при детальных расчетах и проектах ряда вариантов.

14. Напряжение на виток

$$e_w = \pi \sqrt{2} f\Phi.$$

15. Число витков обмоток

$$w_1 = \frac{U_1}{e_w} \text{ и } w_2 = \frac{U_2}{e_w}.$$

При необходимости регулировки надо соответственно увеличить число витков обмотки *ВН*.

16. Сечение витка обмотки

$$q_1 = \frac{I_1}{s} \text{ и } q_2 = \frac{I_2}{s}.$$

(Уточняется после выбора меди по стандарту.).

17. Выбор типа обмотки.

18. Максимальная ширина меди между охлаждающими поверхностями при двухстороннем охлаждении (рис. 72)

$$\beta = \frac{w}{10 s^2} \text{ мм},$$

где $w$ — допустимая плотность теплового потока, *вт/м²* (табл. 36);

$s$ — плотность тока, *а/мм²*.

При одностороннем охлаждении

$$\beta = \frac{w}{20 s^2} \text{ мм}.$$



*Таблица 36*

**Плотность теплового потока**

| Части трансформатора | Плотность теплового потока $w$ (в *вт/м³*) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Масляное охлаждение | | Воздушное охлаждение | |
| | Естественное | Принудительная циркуляция | Через конвекцию | Конвекция и лучеиспускание |
| Катушки: | | | | |
| а) многослойные . . . . | 1000—1200 | — | 200 | 400 |
| б) однослойные и непрерывные . . . . | 1400—1600 | 2000—2500 | 250 | 600 |
| Сердечник . . | 3000 | 4000 | 400 | 700 |

19. Общее сечение меди, которое можно разместить в окне (рис. 140)

$$4S'_{Cu} \approx 2H \frac{\beta}{\beta + \delta_к + \Delta_i} (b_1 + b_2) k_и,$$

где $\delta_к$ — ширина канала согласно табл. 38;

$\Delta_i$ — толщина изоляции провода на две стороны и межслоевой изоляции (табл. 25, 26);

$k_и$ — коэффициент, учитывающий изоляцию внутри катушек: $k_и = 0{,}75 - 0{,}9$ для прямоугольных проводников сечением $q = 5{,}7 - 30$ *мм²*; $k_и = 0{,}6 - 0{,}8$ и для круглых проводников $q = 0{,}1 - 3$ *мм²*. Приближенно

$$4S'_{Cu} \approx 2H (b_1 + b_2) \varphi'_{Cu},$$

где

$$\varphi'_{Cu} = 0{,}25 - 0{,}4.$$

20. Необходимое сечение меди в окне

$$4S_{Cu} = \frac{4Iw}{s}.$$

Должно быть

$$4S_{Cu} \leqslant 4S'_{Cu} \text{ и } S_{Cu} \geqslant \frac{F_R}{2\pi\, 600}. \qquad (70)$$

Можно также определить полный коэффициент заполнения

$$\varphi_{Cu} = \frac{4Iw}{s l_0 l_s}$$

и сравнить его с данными рис. 151 или табл. 42. Если окажется, что коэффициент заполнения значительно выше и обмотка не размещается в окне, необходимо соответственно увеличить размеры окна; если $\varphi_{Cu}$ окажется значительно ниже, необходимо поступить наоборот.

21. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_р = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I w l_w \delta' k_R}{\Phi H},$$

где $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$ *гн/см*;

$\delta'$ — приведенная ширина канала рассеяния

$$\delta' \approx \frac{1}{3}(b_1 + b_2) + \delta'_{12};$$

$b_1 + b_2$ — полная ширина обмоток без осевых охлаждающих каналов;

$$\delta'_{12} = \delta_{12} + \frac{1}{4}(\delta_1 + \delta_2);$$

$k_R$ — коэффициент Роговского

$$k_R \approx 1 - \frac{b_1 + b_2 + \delta_{12}}{\pi H}.$$

Сравниваем полученную величину $u_p$ с заданной (п. 4). При близкой сходимости полученной и заданной величин можно приступить к окончательному расчету. При значительном расхождении (более 10%) необходимо несколько изменить размеры, определяющие величину $u_p$. При неизмененном диаметре уменьшение $u_p$ возможно получить путем увеличения высоты обмотки при одновременном уменьшении ее ширины и сокращении ширины окна. Увеличения можно достигнуть уменьшением высоты обмотки или увеличением канала рассеяния при увеличении ширины окна. Увеличение диаметра стержня при заданном весе активных материалов приводит к росту $u_p$ ввиду увеличения длины витка и сильного уменьшения высоты обмотки $H$.

На основании выбранных размеров приступают к электромагнитному расчету трансформатора.

В окончательном расчете за основу принимаются уточненные согласно пп. 13, 21 размеры, производится полная конструктивная разработка, проверяется термическая и механическая прочность.

Уточненное значение диаметра округляем до целого числа или ближайшего по заводским нормативам (см. табл. 42). Просчитываем по выбранному значению диаметра пп. 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14. Выбираем схему регулирования напряжения. Все силовые трансформаторы, согласно ГОСТ, должны иметь в обмотке *ВН* отпайки для регулировки напряжения.

В трехфазных трансформаторах до 5600 *ква* и в однофазных до 1800 *ква* включительно при $U \leqslant 35$ *кв* регулировка выполняется двумя ответвлениями на $\pm 5\%$.

В обмотках всех прочих трансформаторов предусматриваются 4 ответвления $\pm 2 \times 2{,}5\%$. Переключение допускается только при полном отключении трансформатора от сети с помощью встроенного переключателя, выбираемого по напряжению и току в обмотках. Применяемые схемы регулирования указаны на рис. 150.

Схемы *а* и *б* допускают применение наиболее простого переключателя — одного девятизажимного на 3 фазы. Схема *в* требует применения трех однофазных переключателей.

Схема *а* применяется в многослойных цилиндрических обмотках при соединении звездой, *б* — при катушечной непрерывной обмотке при $U < 35$ *кв*. Схема *в* — там же, где *б* при напряжении от 3 до 220 *кв*.

Разрыв обмотки в схемах *б* и *в* выполняется в виде масляного канала. Размер этого канала в схеме *б* определяется половиной фазного напряжения, в *в* — примерно 0,05 — 0,1 от фазного напряжения (см. табл. 27). Это и ограничивает применение схемы *б*.

Выбираем по сортаменту (приложение III) обмоточные провода и уточняем величины плотности тока ($s_1$ и $s_2$). При больших сечениях витка желательно составить его из нескольких параллельных проводников сечением $q \leqslant 25 - 30$ *мм²* для уменьшения добавочных потерь.

22. Размещение обмоток и окончательный расчет. Необходимо заданное число витков $w_1$ и $w_2$ разместить на определенной высоте обмотки $H$ при заданной ширине обмоток $b_1$ и $b_2$. Методы размещения обмоток и определения их размеров см. в примере расчета и [128].

Разместив обмотку, получаем точные размеры $H$, $l_s$, $l_0$ и окончательные значения весов, потерь и напряжения короткого замыкания.

23. Вес меди. По эскизу находим средний диаметр обмоток высшего и низшего напряжения (рис. 140, *б*; 160):

$$D_1 = D + 2\delta_{02} + b_2;$$
$$D_2 = D + 2\delta_{02} + 2b_2 + 2\delta_{12} + b_1.$$

Средняя длина витка обмоток

$$l_{w_1} = \pi D_1; \quad l_{w_2} = \pi D_2; \quad l_w = \frac{1}{2}(l_{w_1} + l_{w_2}).$$

Вес меди обмоток:

$$G_{Cu_1} = q_{Cu_1} w_1 l_{w1} m\gamma_{Cu}; \quad G_{Cu_2} = q_{Cu_2} w_2 l_{w2} m\gamma_{Cu};$$
$$G_{Cu} = G_{Cu_1} + G_{Cu_2}; \quad g_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P} \text{ кг/ква}.$$

24. Потери в меди. Согласно ГОСТ, потери в меди определяют при номинальном токе и температуре 75°С:

а) основные потери:

$$p_{Cu_1} = 2{,}4 s_1^2 G_{Cu_1}; \quad p_{Cu_2} = 2{,}4 s_2^2 G_{Cu_2}; \quad p_{Cu} = p_{Cu_1} + p_{Cu_2}$$

или

$$p_{Cu} \approx 2{,}4 s^2 G_{Cu},$$

где $s$ — средневзвешенная плотность тока, *а/мм²*;

б) добавочные потери от вытеснения тока в проводниках обмотки учитываются коэффициентом сопротивления $k_r$ (гл. 5).

Для концентрических обмоток из прямоугольной меди (рис. 152)

$$k_r = 1 + h^4 \left(\frac{H_{Cu}}{H} k_R\right)^2 \frac{m^2 - 0{,}2}{9}.$$

Для концентрических обмоток из круглой меди

$$k_r = 1 + d^4 \left(\frac{H_{Cu}}{H} k_R\right)^2 \frac{m^2 - 0{,}2}{15{,}25}.$$

В мощных трансформаторах, кроме указанных потерь, учитывают добавочные потери $p_{доб}$ от потоков рассеяния в отводах и металлических конструкциях.

Полные потери в меди (потери короткого замыкания)

$$p_к = p_{Cu_1}k_{r1} + p_{Cu_2}k_{r2} + p_{доб}.$$

25. Напряжение короткого замыкания определяют через составляющие. Активная составляющая

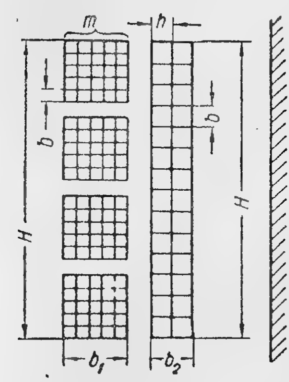



Рис. 152. Эскиз для определения коэффициента сопротивления.

$$u_а = \frac{p_к}{P}.$$

Реактивная составляющая для симметричных концентрических обмоток

$$u_р = \frac{\mu_0 \sqrt{2}\, Iwl_w\delta' k_R}{H\Phi} = x_к,$$

где $\delta'$ — приведенный канал рассеяния; в обмотках без осевого подразделения

$$\delta' = \delta_{12} + \frac{1}{3}\left(b_1 + b_2\right);$$

в обмотках, подразделенных осевыми охлаждающими каналами (рис. 153),

$$\delta' = \delta_{12} + \frac{1}{3}(b_1' + b_1'' + b_2' + b_2'') + \delta_1\left(\frac{b_1'}{b_1' + b_1''}\right)^2 + \delta_2\left(\frac{b_2'}{b_2' + b_2''}\right)^2.$$

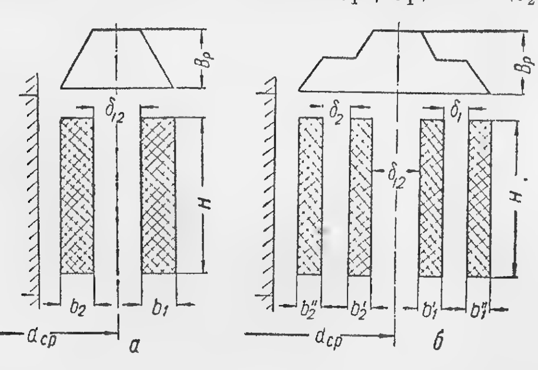



Рис. 153. Эскиз для расчета рассеяния: *а* — неподразделенные обмотки; *б* — подразделенные обмотки.

Приближенно

$$\delta' = \delta_{12}' + \frac{1}{3}(b_1 + b_2); \quad \delta_{12}' = \delta_{12} + {}^1/_4(\delta_1 + \delta_2).$$

Коэффициент Роговского

$$k_R = 1 - \sigma\left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right) \approx 1 - \sigma;$$

$\sigma = \dfrac{\delta_{12} + b_1 + b_2}{\pi H}$ — обычно небольшая величина.



При несимметрии обмоток по высоте необходимо учесть наличие добавочной поперечной составляющей потока рассеяния. По [83]

$$u_р' = x_к' \approx x_к\left(1 + k_H \frac{h^2}{l_q\delta''}\right),$$

где $k_H = 1$ — при осевом сдвиге $h$ одной обмотки относительно другой или при одностороннем укорочении обмотки $h$; $k_H = \frac{1}{4}$ при выключении части обмотки $h$ по середине (рис. 154);

$$l_q = \frac{l_s}{\pi} + \frac{1}{2}(D_2 - D_1); \quad \delta'' \approx \delta'.$$

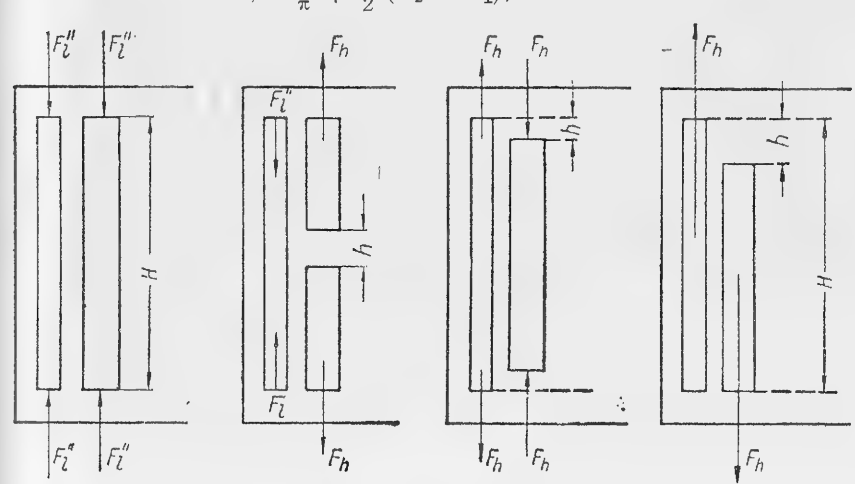



Рис. 154. Несимметричное расположение обмоток.

Асимметрию легко можно уменьшить, сделав в месте отключения «разгон» соответствующих витков второй обмотки, т. е. расположив на этом участке витки или катушки с увеличенными зазорами между ними.

Напряжение короткого замыкания

$$u_к' = \sqrt{(u_р')^2 + u_а^2} = \sqrt{(x_к')^2 + r_к^2}.$$

26. Уточнение размеров сердечника. Необходимо окончательно определить размеры пакетов, образующих сердечник. При этом необходимо учесть условия эксплуатации (охлаждение) и производства. По выбранной ширине пакетов строят эскиз сечения сердечника, находят сечение пакетов и уточняют значение $S_{Fe}$ и $\varphi_{Fe}$ по выбранному типу изоляции.

27. Вес стали:

а) сердечников

$$G_s = mS_{Fe}l_s\gamma_{Fe} \ кг,$$

б) ярем

$$G_j = 2S_jl_j\gamma_{Fe} \ кг; \quad 2l_j \approx m\left(1{,}8D + \frac{m+1}{3}l_0\right).$$

В целях упрощения сборки магнитопровода и уменьшения числа типоразмеров пластин форму ярма (рис. 155,*а*) обычно берут более простой, чем форма сердечника (рис. 155,*б*). Обычно форма соответствует позициям *A*, *B*, *C*. Фигурную форму ярма *D*, *E*, *F* применяют для более равномерного распределения индукции между отдельными пакетами. Так как полной равномерности добиться сложно, то для понижения потерь и тока холостого хода обычно увеличивают сечение ярма на 5—15% по сравнению с сечением сердечника. Большее увеличение соответствует прямоугольному ярму. Выбрав $S_j$, делаем эскиз с учетом коэффициента изоляции.

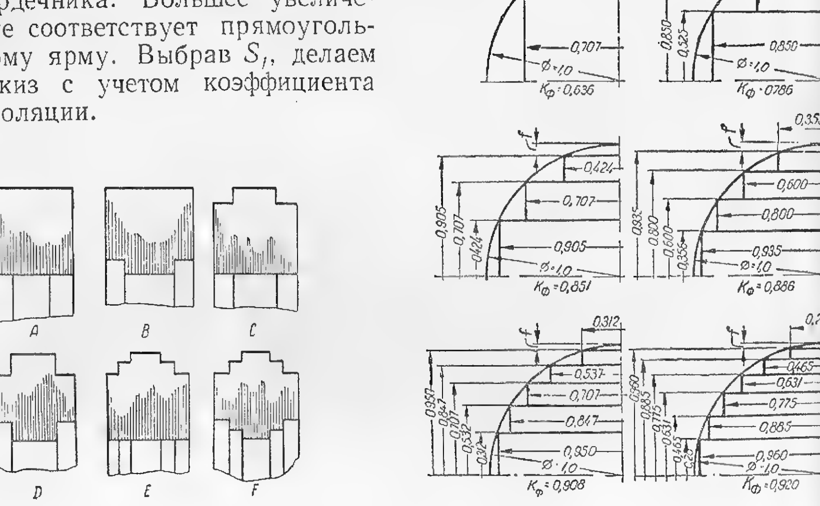



Рис. 155. Формы сечения:
*а* — ярма, *б* — сердечника.

Средняя длина ярма $l_j$ может быть найдена по эскизу или расчетным путем

$$l_j = (m-1)(l_0 + D) + \frac{S_{\mathrm{Fe}}}{b_j k_{\text{п}}},$$

где $b_j$ — ширина ярма.

Вес стали

$$G_{\mathrm{Fe}} = G_s + G_j; \quad g_{\mathrm{Fe}} = \frac{G_{\mathrm{Fe}}}{P} \text{ кг/ква}.$$

28. Потери в стали. Зная индукцию в стержне и ярме и сорт стали, по таблице находим удельные потери $p_s'$ и $p_j'$

$$p_{\mathrm{Fe}} = p_s' G_s + p_j' G_j.$$

При применении холоднокатаной стали необходимо учесть влияние магнитной анизотропии. В этом случае потери в стержнях учитываются как обычно. Потери в ярме разделяют на 2 части: в первой части длиной $l_j' = (m-1)\,l_0$ силовые линии направлены в направлении проката. Удельные потери выбирают согласно приложению II; во второй части длиной $l_j' \approx m\,0{,}9D$ или $l_j'' = l_j - l_j'$ силовые линии направлены под углом к направлению проката. Для этой части удельные потери, взятые по приложению II, увеличивают на 40%.

29. Ток холостого хода определяют по составляющим. Активная составляющая

$$I_{0а} = \frac{p_{\mathrm{Fe}}}{P}.$$

Реактивная составляющая тока холостого хода определяется намагничивающей (реактивной) мощностью, которая тратится на создание магнитного потока. Величина удельных намагничивающих мощностей в зависимости от индукции для разных материалов дана в приложении II.

Значительная часть полной намагничивающей мощности тратится на проведение потока через немагнитные промежутки (стыки). В настоящее время в трансформаторах применяется сборка железа внахлестку, что значительно уменьшает немагнитный зазор и, следовательно, намагничивающую мощность. В приложении даны намагничивающие мощности на 1 *см*² стыка при заданной индукции.

$$I_{0р} = \frac{w_s' G_s + w_j' G_j + S_{\mathrm{Fe}} n_{\text{ст}} w_{\text{ст}}'}{P},$$

где $n_{\text{ст}}$ — число стыков в магнитопроводе.

Ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{0а}^2 + I_{0р}^2}.$$

30. Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\alpha^2 p_{\text{к}} + p_{\mathrm{Fe}}}{\alpha P \cos\varphi_2 + \alpha^2 p_{\text{к}} + p_{\mathrm{Fe}}},$$

где $\alpha$ — коэффициент нагрузки трансформатора

$$\alpha = \frac{I}{I_N}.$$

К. п. д. имеет максимум при

$$\alpha^2 p_{\text{к}} = p_{\mathrm{Fe}},$$

т. е. при такой нагрузке, когда постоянные потери (не зависящие от нагрузки) равны переменным потерям. Ток, соответствующий такой нагрузке,

$$I = I_N \frac{1}{\sqrt{\xi}}.$$

31. Изменение напряжения при номинальном токе нагрузки

$$\Delta u\,\% = u_а \cos\varphi + u_р \sin\varphi + \frac{(u_р \cos\varphi - u_а \sin\varphi)^2}{200}.$$

(Величины $u_а$ и $u_р$ подставить в %.)

По окончании электрического расчета необходимо провести тепловой и механический расчет конструкции.

## Тепловой расчет

При работе трансформатора происходит его нагрев за счет потерь, выделяющихся в активных материалах. Исходя из условий теплостойкости применяемых материалов (особенно изоляции), ГОСТ установлены максимально допустимые перегревы над базовой температурой различных частей трансформаторов, заполненных маслом (табл. 37).

*Таблица 37*

**Превышения температуры**

| Части трансформатора | °C | Метод измерения |
|---|---|---|
| Обмотка | 70 | По изменению сопротивления |
| Сердечник на поверхности | 75 | По термометру |
| Масло в верхних слоях | 60 | По термометру |

Базовой температурой является температура охлаждающей среды, установленная ГОСТ ($\theta = 25°$ C для воды; $\theta = 35°$ C для воздуха).

При применении сухих трансформаторов с воздушным охлаждением допустимый перегрев определяется теплостойкостью примененных изоляционных материалов и условиями механической прочности обмоток. Применение стекловолокна с кремнийорганическими лаками позволяет значительно повысить перегревы. Отсутствие масла в сухих трансформаторах обеспечивает пожаро- и взрывобезопасность, что позволяет устанавливать их непосредственно в жилых домах, в цехах и т. д. в виде комплектных подстанций. Однако отсутствие масла не только сказывается на увеличении изоляционных промежутков, но и ухудшает условия охлаждения. В масляном трансформаторе масло является не только изолирующим материалом, но и промежуточной средой, снимающей тепло с активных частей и передающей его наружной, сильно развитой поверхности бака.

В сухом трансформаторе тепло передается непосредственно с поверхности активных материалов (сравнительно небольшой) окружающему воздуху, в силу чего удельные нагрузки при обычной изоляции принимают более низкие, чем в масляном трансформаторе.

Для масляного трансформатора нагрев обмотки складывается из перепада температуры между поверхностью активных материалов и маслом, перепада внутри катушки и перепада между маслом и воздухом.

П е р е п а д  м е ж д у  п о в е р х н о с т ь ю  а к т и в н ы х  м а т е р и а л о в  и  м а с л о м (§ 6-8).

$$\theta_{1м} = \frac{p_{Cu}}{\alpha_м S} = \frac{w_{Cu}}{\alpha_м}; \quad \theta_{2м} = \frac{p_{Fe}}{\alpha_м S_{Fe}},$$

где $S$, $S_{Fe}$ — теплоотдающие поверхности обмоток и магнитопровода, $м^2$;

$\alpha_м$ — коэффициент теплоотдачи от омываемой маслом поверхности к маслу.

При подсчете эффективной поверхности необходимо учитывать, что размер каналов не должен быть меньше указанных в табл. 38.



*Таблица 38*

**Размеры охлаждающих каналов** (*в см*)

| Вертикальные каналы | | | | Горизонтальные каналы | |
|---|---|---|---|---|---|
| Длина | Обмотка — обмотка | Обмотка — цилиндр | Обмотка — стержень | Длина | Обмотка — обмотка |
| 30 | 0,4—0,5 | 0,4 | 0,4—0,5 | 3 | 0,4 |
| 30—50 | 0,5—0,7 | 0,5 | 0,5 | 3—5 | 0,5 |
| 50—100 | 0,7—0,8 | 0,5—0,6 | 0,6—0,7 | 5—6 | 0,6 |
| 100—150 | 0,8—1,0 | 0,6—0,7 | 0,7—0,9 | 6—7 | 0,7 |

В сухих трансформаторах ширина вертикальных каналов должна быть не ниже 1,5—2,0 *см*, горизонтальных — 1,0—1,2 *см*.

Коэффициенты теплоотдачи в масле сами зависят от перепада температур между медью и маслом. Поэтому обычно связь между перепадом температур и плотностью теплового потока *вт/м*² выражают при помощи эмпирических формул:

для цилиндрических обмоток с вертикальными охлаждающими каналами

$$\theta_м = 0{,}28 w^{0,6}\ °C;$$

для обмоток с горизонтальными охлаждающими каналами (дисковой или катушечной)

$$\theta_м = k_1 k_2\, 0{,}35 w^{0.6}\ °C,$$

где $k_1$ — учитывает затруднение конвекции масла в каналах внутренних обмоток (для внешних обмоток $k_1 = 1$, для внутренних $k_1 = 1{,}1$);

$k_2$ — учитывает влияние на конвекцию ширины горизонтальных масляных каналов $\delta_к$ в зависимости от отношения ширины канала к ширине обмотки $\frac{\delta_к}{b}$ и принимается по табл. 39.

*Таблица 39*

**Коэффициент конвекции**

| $\frac{\delta_k}{b}$ | 0,1 | 0,11—0,12 | 0,13—0,14 | 0,15—0,19 | 0,2 и более |
|---|---|---|---|---|---|
| $k_2$ | 1 | 0,95 | 0,9 | 0,85 | 0,8 |

Перепад температур на поверхности магнитопровода обычно не подсчитывается, так как при плотностях теплового потока, соответствующих табл. 36, перегрев лежит в допустимых пределах.

П е р е п а д  т е м п е р а т у р ы  в н у т р и  м н о г о с л о й н ы х  к а т у ш е к из круглого провода по § 6-8

$$\theta_i = \frac{s^2 \rho}{8} \frac{n^2\, d\, \Delta_i k_1}{k_i},$$

где $n$ — число слоев;
$d$ — диаметр провода, *см*;
$\Delta_i$ — толщина изоляции, *см*;
$k_i$ — коэффициент теплопроводности;
$k_1$ — коэффициент, учитывающий закрытие поверхностей.

Рассматривая случай трансформатора, имеющего обмотки из медного провода ($\rho_{75} = 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ *омсм*) с обычной изоляцией (бумага или картон, пропитанные маслом, $k_i \approx 0{,}0015$ *вт/см°С*), получим

$$\theta_i = 1{,}83 \cdot 10^{-4} n^2 d \Delta_i s^2 k_1 \, ^\circ C.$$

Для одно- или двухслойных катушек из прямоугольного провода

$$\theta_i = \frac{w \Delta_i a'}{k_i (a' + a)},$$

где $a$ и $a'$ — соответственно размер голого и изолированного провода.

Перепад температуры между маслом и воздухом (средний) слагается из перепадов от масла к стенке бака, в стенке бака и от бака к воздуху. Надо отметить, что с увеличением мощности трансформатора условия охлаждения значительно ухудшаются (мощность растет примерно пропорционально третьей степени линейных размеров, а охлаждающая поверхность пропорционально второй степени). Только у самых мелких силовых трансформаторов применяется бак с гладкими стенками (до 50 *ква*). В более мощных трансформаторах необходимо увеличивать теплопередающую поверхность. При этом надо учитывать, что бак трансформатора не только передает тепло, но и должен обладать достаточной механической прочностью. Для развития охлаждающей поверхности в настоящее время в СССР применяются либо трубчатые, либо радиальные баки.

В конструкции с трубчатыми баками в стенки бака вваривается необходимое число труб, располагаемых рядами (от одного до трех рядов). Основные данные по трубчатым бакам даны в приложении. Для увеличения поверхности охлаждения и уменьшения объема масла иногда применяют трубы овального сечения.

В трансформаторах с радиаторными баками к стенкам последних присоединяются дополнительные трубчатые охладители, позволяющие значительно увеличить поверхность охлаждения. Подобная конструкция обычно применяется при мощностях свыше 1800 *ква*.

Тепло от бака к воздуху передается конвекцией и излучением.

Коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, пренебрегая влиянием высоты бака, можно считать равным

$$\alpha_к = \alpha_{к20} \left(\frac{\theta}{20}\right)^{1/4},$$

где $\alpha_{к20} \approx 6—7$ *вт/м²°С* — теплоотдача при перепаде, равном 20° С.

Коэффициент теплоотдачи через излучение

$$\alpha_л = \alpha_{л20} \left(\frac{\theta}{20}\right)^{1/4},$$

где

$$\alpha_{л20} \approx 6 \text{ вт/м}^2 \, ^\circ C.$$



При этом надо учитывать, что при помощи конвекции тепло со всех нагретых поверхностей передается лучше или хуже в зависимости от закрытия поверхности другими деталями.

При помощи излучения тепло передается только с открытой внешней поверхности. Точное определение этих поверхностей и учет ухудшения теплоотдачи с закрытых или частично закрытых поверхностей представляет трудную задачу. Поэтому для вычисления суммарного перепада масло — воздух воспользуемся формулой Московского трансформаторного завода (МТЗ)

$$\theta_{м.\,в} = 0{,}262\, w_б^{0,8} \, ^\circ C,$$

где

$$w_б = \frac{1{,}05 \Sigma p}{S_{эф}} \text{ вт/м}^2;$$

$S_{эф}$ — эффективная охлаждающая поверхность бака и труб.

Предварительный выбор внутренних размеров бака производится на основе соблюдения необходимых изоляционных расстояний между обмотками, отводами и баком или ориентировочно по табл. 40.

*Таблица 40*

**Изоляционные расстояния бака**

| Класс изоляции (в *кв*) | Габарит трансформатора | Размеры (в *мм*) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *a* | *b* | *c* |
| 3—10 | I—II | 100 | 80 | 300 |
| | III | 200 | 150 | 400 |
| 35 | I—II<br>III<br>III<br>IV | 200<br>250 *<br>300 **<br>300 | 160<br>180 *<br>180 **<br>180 | 500<br>850 *<br>500 **<br>500 |
| 110 | Трехфазные трансформаторы | 800 | 800 | 500 |
| | Однофазные трансформаторы | 800 | 650 | 500 |

Примечание: *a* — ширина бака минус внешний диаметр наружной обмотки; *b* — длина бака минус длина выемной части; *c* — высота бака минус высота магнитопровода (с опорами).

В дальнейшем размеры бака уточняются, исходя из удобства крепления нормализованных радиаторов и требований теплового расчета.

* Переключатель прикреплен к крышке.
** Переключатель на уровне обмоток.

Полная эффективная охлаждающая поверхность слагается из:
а) эффективной поверхности крышки бака

$$S_{к.эф} = 0{,}75\, S_к,$$

где $S_к$ — полная геометрическая поверхность крышки;
б) эффективной поверхности бака
для бака с радиаторами

$$S_{б.эф} = S_б = H_б П_б;$$

для бака с трубами

$$S_{б.эф} = k H_б П_б,$$

где $П_б$ — периметр бака;
$H_б$ — высота бака;
$k$ — коэффициент закрытия, учитывающий закрытие поверхности трубами и соответствующее ухудшение теплоотдачи. Величина его зависит от диаметра труб, их шага и числа рядов (табл. 41);

*Таблица 41*

**Коэффициент закрытия**

| Число рядов | 1 | 2 | 3 | 4 | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| Шаг труб 75 *мм* | 0,895 | 0,760 | 0,705 | 0,602 | Таблица составлена для труб диаметром 51 *мм* |
| Шаг труб 70 *мм* | 0,883 | 0,754 | 0,700 | 0,597 | |

в) поверхности радиаторов или труб

$$S_{тр.эф} = k S_{тр}.$$

Коэффициент $k$ берется согласно табл. 41.

В крупных трансформаторах (свыше 7500 *ква*) для улучшения охлаждения применяется дутье. Поверхность охлаждения трансформатора с дутьевым охлаждением выбирается такой величины, чтобы при отключенных вентиляторах трансформатор мог быть нагружен до $0{,}66\, P_N$.

При наличии дутья перепад температур между маслом и воздухом

$$\theta_{м.в} = 0{,}191\, w_б^{0,8}\ °C.$$

При подсчете $w_б$ эффективную поверхность бака и труб необходимо увеличить на 5% за счет дутья.

Применение дутья несколько (примерно на 10%) уменьшает и перепад температуры между обмотками и маслом за счет увеличения скорости циркуляции масла.

Таким образом, перегрев обмотки равен

$$\theta_1 = \theta_{1м} + \theta_i + \theta_{м.в}.$$



Перегрев поверхности сердечника

$$\theta_2 = \theta_{2м} + \theta_{м.в}.$$

Перегрев масла в верхних слоях

$$\theta'_{м.в} \approx \theta_{м.в}\left(1 + 0{,}4\frac{l_s}{H_б}\right) \approx 1{,}2\theta_{м.в}.$$

При расчете сухого трансформатора основной перепад температур имеет место между поверхностью активных материалов и воздухом. Для вычисления этого перепада необходимо с достаточной точностью определить для каждой активной части поверхности теплоотдачи путем конвекции и излучения и затем подсчитать перепады температур, воспользовавшись выражениями коэффициентов теплоотдачи, приведенными выше.

## Механический расчет

При протекании тока в обмотках трансформатора создаются электродинамические силы, действующие на обмотки и крепежные детали. Так как наибольшей величины ток в обмотках достигает в начальный момент короткого замыкания (ударный ток), то проверка механической прочности производится для этого тока.

При концентрических обмотках радиальная сила равна [83]*

$$F_R = \frac{10{,}2}{2\pi f}\frac{P k_A^2}{m u_к}\left(\frac{1}{l'} + \frac{2}{D_1 + D_2}\right)\ кг,$$

где $k_A$ — коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока короткого замыкания,

$$k_A = 1 + e^{-\pi\frac{u_a}{u_p}}.$$

Выражение для силы найдено в предположении монолитности обмоток и дает среднее значение силы.

Среднее напряжение на разрыв

$$\sigma = \frac{F_R}{2\pi w q_{Cu}} < \sigma_{доп} \approx 600\ кг/см^2.$$

В концентрических симметричных обмотках от взаимодействия токов, протекающих в витках каждой обмотки, создается осевая сила, сжимающая обмотки

$$F''_l = k\frac{\delta'}{2H} F_R,$$

где, по данным [70], для внутренней обмотки $k = 1{,}4$, для наружной обмотки $k = 0{,}6$.

При несимметричном расположении обмоток (рис. 154) возникает добавочная осевая сила

$$F_h \approx 4F''_l k_H \frac{2hH}{l_q''}.$$

Коэффициент $k_H$ дан на стр. 351, там же даны значения $l_q$ и $\delta''$.

* В формуле для $F_R$ в [83] ошибочно введен коэффициент 0,5.

Для приведенных случаев сила, действующая на обмотку в центре, равна $F_h + F''_l$.

Осевые силы вызывают необходимость создания прочной конструкции. Усилия передаются материалом обмоток и дистанционными прокладками. Напряжение, создаваемое в прокладках,

$$\sigma = \frac{F_h + F''_l}{nab},$$

где $n$ — число прокладок по окружности катушки;
$a$ — ширина прокладки;
$b$ — ширина катушки обмотки.

Допускаемое напряжение

$$\sigma_{доп} < 200\ кг/см^2.$$

Для дисковых катушек число опор выбирают таким, чтобы расстояние между их осями не превышало 80—120 *мм*.

Прессующие консоли рассчитываются на изгиб при прессовке ярма

$$M = \frac{ph_j L^2}{8},$$

где $p$ — удельное давление при прессовке $\approx 1\ кг/см^2$;
$h_j$ — высота ярма;
$L$ — расстояние между прессующими шпильками.

Швеллер необходимого размера или сварную балку подбирают по допустимому напряжению

$$\sigma = \frac{M}{W} < 1000\ кг/см^2,$$

где $W$ — момент сопротивления швеллера.

Шпильки ярма рассчитывают на подъем выемной части:

для трехфазного

$$\sigma = 0{,}187\frac{ph_j l_j}{S} + 2{,}5\frac{Gx}{d^3} \leqslant 1000\ кг/см^2;$$

для однофазного

$$\sigma = 0{,}5\frac{ph_j l_j}{S} + 2{,}5\frac{Gx}{d^3} \leqslant 1000\ кг/см^2,$$

где $G$ — вес выемной части;
$d$ и $S$ — диаметр и сечение шпильки;
$x$ — расстояние от ярма до консоли.

В трансформаторах I—II габаритов между ярмом и консолью кладут только электрокартонную прокладку толщиной 1,5 *мм*; в трансформаторах III габарита при $D < 25$ *см* — картонную прокладку 3 *мм*; $D = 25 - 30$ *см* — прокладка и канал шириной 12 *мм* (с ростом диаметра канал увеличивают до 25 *мм*).

Давление на изоляцию шпильки при подъеме выемной части

$$p = 0{,}25\frac{G}{da} \leqslant 200\ кг/см^2,$$

где $a$ — длина втулки.



Механический расчет бака представляет чисто конструктивную разработку. Согласно ГОСТ 401-41 баки трансформатора должны выдерживать внешнее и внутреннее давление 0,5 *ати*. Кроме того, механическая конструкция должна обеспечивать подъем за крюки собранного и залитого маслом трансформатора. Расчет бака выходит за рамки данного раздела. Можно дать только следующие рекомендации.

Трансформаторы I габарита имеют толщину стенок бака 3÷4 *мм*, дна — 4 *мм*, крышки — 3÷6 *мм*.

Трансформаторы II—III габарита имеют толщину стенки 4÷6 *мм*, дна — 4÷8 *мм*, крышки — 6÷10 *мм*.

Трансформаторы IV габарита имеют толщину стенок 6—12 *мм*, дна и крышки 12—40 *мм*. При необходимости стенки, дно и крышку укрепляют при помощи ребер жесткости. Особенности конструкции и расчета бака и тележки см. [100].

Вес выемной части трансформатора (без крышки и расширителя)

$$G \approx 1{,}2\,(G_{Fe} + G_{Cu}).$$

Объем выемной части

$$V = \frac{G}{\gamma_{в.ч}},$$

где $\gamma_{в.ч} \approx 5{,}5\ кг/дм^3$ — средний удельный вес выемной части.

Вес и объем бака и радиаторов (труб) может быть вычислен по известным данным (приложение VIII).

Объем масла в трансформаторе

$$V_м = V_б - V.$$

Вес масла

$$G_м = \gamma_м V_м,$$

где

$$\gamma_м = 0{,}9\ кг/дм^3.$$

Объем расширителя выбирается таким образом, чтобы при колебаниях внешней температуры в пределах ± 35° С и перегрева верхних слоев масла от 0° С до 60° С верхний уровень масла находился в расширителе

$$V_р \approx 0{,}1\,V_м.$$

Расширитель (рис. 156) изготовляют из листовой стали толщиной 1,5—4 *мм* и устанавливают горизонтально над крышкой трансформатора вдоль узкой стороны справа, если смотреть со стороны вводов ВН. Расширитель устанавливается на трансформаторах мощностью больше 100 *ква*. При выборе размеров расширителя необходимо учесть, что нежелательно увеличение габаритов трансформатора, т. е. он не должен выходить за пределы охлаждающих устройств (труб или радиаторов). Следует стремиться уменьшить высоту его установки для снижения давления масла в баке. В то же время надо обеспечить изоляционные расстояния от вводов до расширителя и проверить возможность подъема трансформатора или

выемной части на стропах, которые не должны задевать расширитель.

В табл. 42 представлена сводка данных построенных трансформаторов (*М.О* — расстояние между осями стержней; $C_т$ — постоянная трансформатора).

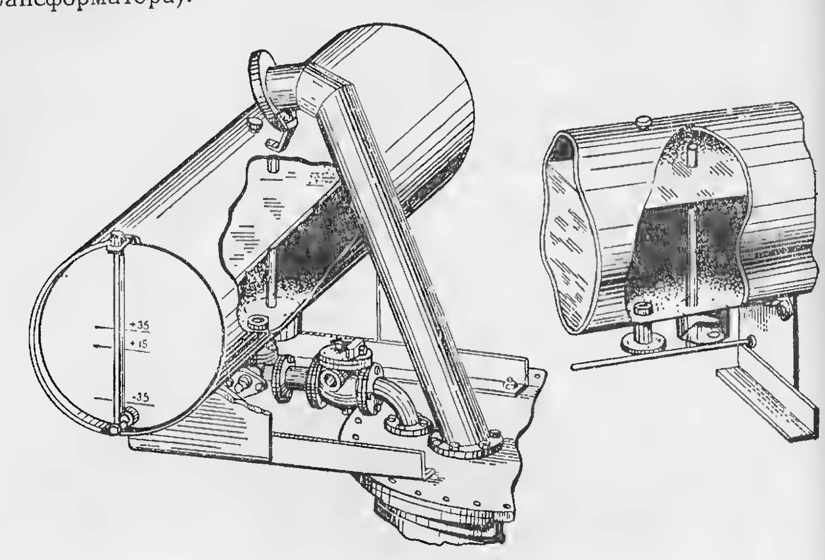



Рис. 156. Расширитель.

## 9-5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При проектировании мощных трансформаторов встречается ряд специфических вопросов, значительно влияющих на методику расчета.

Одной из основных проблем, которую должен решить конструктор, является вопрос транспортабельности. Рост мощности трансформаторов ограничен возможностью доставки изготовленной единицы на место монтажа. Основным средством перевозки служит железная дорога, которая может пропустить грузы определенного габарита. Для того чтобы «вписать» трансформатор в пределы железнодорожного габарита, применяют ряд мер — специальные платформы, перевозку в транспортном баке и т. п. Задача конструктора заключается в выборе размеров, обеспечивающих возможность перевозки. Для решения этой задачи часто применяют конструкцию магнитопровода с боковыми ярмами (рис. 157). Подобная конструкция позволяет снизить высоту основного ярма примерно вдвое и, следовательно, снизить высоту самого трансформатора. Некоторое уменьшение ширины трансформатора достигается за счет применения облегающего бака (повторяющего форму выемной части) Применение облегающих баков не только снижает габарит трансформа-



*Таблица 42*

**Данные построенных трансформаторов**

| P (в ква) | $U_{вн}$ (в кв) | $U_{нн}$ (в кв) | $p_к$ (в вт) | $p_0$ (в вт) | $I_0$ (в %) | $u_к$ (в %) | D (в см) | $l_S$ (в см) | М. О (в см) | $S_S$ (в см²) | $S_j$ (в см²) | $G_S$ (в кг) | $G_j$ (в кг) | $B_S$ (в гс) | $s_1$ (в а/мм²) | $s_2$ (в а/мм²) | $G_{Cu}$ (в кг) | $C_т$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 6 | 0.4 | 600 | 180 | 9,00 | 5,5 | 9,5 | 22 | 20,5 | 52 | 60.6 | 27 | 44,5 | 14350 | 2.34 | 3,06 | 38.3 | 0.800 |
| 50 | 6 | 0.4 | 1255 | 367 | 7.95 | 5,5 | 12,0 | 25 | 24,5 | 86 | 105 | 51,5 | 92,5 | 14550 | 3.20 | 2,61 | 61.4 | 0,800 |
| 50 | 35 | 0.4 | 1262 | 476 | 9.65 | 6,5 | 12.7 | 42 | 31,5 | 95 | 114,3 | 94 | 126 | 14550 | 2.46 | 3.58 | 68.3 | 0,850 |
| 180 | 6 | 0.4 | 4075 | 1046 | 7,50 | 5,5 | 17,0 | 35 | 32,0 | 181,5 | 203 | 145 | 238 | 14300 | 3.74 | 4,31 | 106.8 | 0,836 |
| 180 | 35 | 0,4 | 4180 | 1366 | 7,50 | 6,5 | 17.0 | 52 | 38,5 | 181,5 | 203 | 215 | 278 | 14300 | 3,90 | 2.29 | 117.5 | 0,836 |
| 320 | 35 | 0,4 | 6320 | 2200 | 8,65 | 6,5 | 20,6 | 58 | 42,0 | 249 | 256 | 328 | 385 | 14150 | 3,69 | 4,02 | 168.1 | 0,840 |
| 560 | 35 | 0,5 | 9520 | 2990 | 6,25 | 6,5 | 22.0 | 72 | 44.5 | 304 | 303 | | 988* | 14250 | 3,58 | 3.98 | 308,0 | 0,865 |
| 1000 | 35 | 0.5 | 15550 | 4860 | 5.69 | 5,5 | 25,5 | 83 | 46,0 | 395 | 399 | | 1425* | 14600 | 4,00 | 3.45 | 423,0 | 0,805 |
| 1800 | 35 | 6,3 | 24450 | 8100 | 4,50 | 6,5 | 31,0 | 85 | 56,0 | 595 | 600 | | 2390* | 14550 | 4.60 | 4.26 | 547,0 | 0,847 |
| 3200 | 35 | 6.3 | 35950 | 11600 | 4,11 | 6.9 | 35,5 | 95 | 63.0 | 757 | 760 | | 3420* | 14550 | 4,36 | 3,63 | 916,0 | 0,840 |
| 5600 | 35 | 6,3 | 56700 | 18000 | 4,50 | 7,5 | 43,0 | 95 | 72,0 | 1100 | 1102 | | 5340* | 14500 | 4,50 | 4.46 | 1166,0 | 0,885 |
| 10000 | 35 | 6,3 | 91600 | 27800 | 2.46 | 7,5 | 47,0 | 120 | 78,0 | 1368 | 1437 | | 8110* | 14490 | 4,71 | 4,14 | 1820,0 | 0,840 |
| 15000 | 35 | 10,5 | 121900 | 37000 | 2.26 | 8,17 | 50.9 | 132 | 85,0 | 1634 | 1720 | | 10580* | 14470 | 2,99 | 4,02 | 2692,0 | 0.820 |
| 15000 | 110 | 11 | 131300 | 50800 | 2.99 | 10,5 | 54.8 | 144 | 106,0 | 1903 | 2022 | | 14265* | 14406 | 3.04 | 3.71 | 2355,0 | 0,880 |
| 31500 | 110 | 10,5 | 203600 | 81400 | 2,22 | 10,5 | 62,7 | 192 | 114,0 | 2466 | 2626 | | 22118* | 14530 | 2,61 | 3,12 | 6000,0 | 0.835 |
| 1000 | 10 | 0,4 | 11570 | 3120 | 4.30 | 5,35 | 24.5 | 67 | 45.0 | 378 | 396 | 588 | 656 | 17100 | 3,04 | 3,34 | 462,0 | 0,775 |
| 3200 | 10 | 3,15 | 28700 | 6290 | 2.85 | 5,5 | 32,5 | 79 | 55,0 | 650 | 682 | 1180 | 1380 | 17000 | 3.15 | 3.43 | 1060,0 | 0.767 |
| 120000 | 220 | 13,8 | 576745 | 183000 | 2,12 | 11,8 | 82,3 | 270 | 216,0 | 3980 | 4312 | 24700 | 31900 | 17000 | 2,38 | 3,76 | 22414,0 | 0,785 |

Примечания: Цифры, помеченные звездочкой, обозначают общий вес железа, М. О—расстояние между осями стержней. Последние три строки соответствуют серии ТСМ.

тора, но и объем масла в трансформаторе. К тому же результату может привести снижение изоляционных расстояний за счет применения новых систем изоляции и новых материалов. Большим достижением является разработка более компактных изоляторных вводов, что снижает габариты трансформатора и облегчает его компоновку. Особенностями конструкции мощных трансформаторов является применение магнитопроводов с продольными и поперечными охлаждающими каналами, специальных типов обмоток с вводом высокого напряжения в середину обмотки, что обеспечивает повышение электрической прочности конструкции.

При расчете подобных трансформаторов особое внимание необходимо уделить определению напряжения короткого замыкания. Усложнение расчета вызывается неравномерным распределением витков в катушках *ВН* (рис. 158) по высоте, что объясняется необходимостью обеспечения достаточной электрической прочности обмотки. В результате значительную часть потока рассеяния составляет поперечный поток рассеяния. Обычно расчет проводят по участкам, разбивая обмотки по высоте на ряд участков с одинаковым распределением ампер-витков.

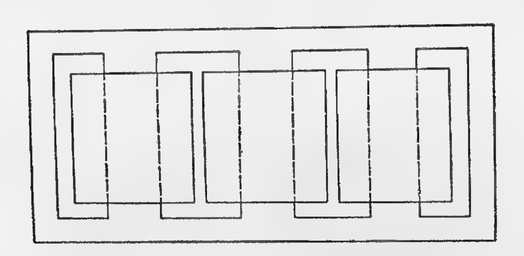


Рис. 157. Магнитопровод с боковыми ярмами.

Для высоковольтных трансформаторов обязательным является проверка распределения перенапряжения в обмотках (емкостный расчет). Применение грозоупорных обмоток позволяет добиться почти устойчивого равномерного распределения потенциала вдоль обмотки при перенапряжениях.

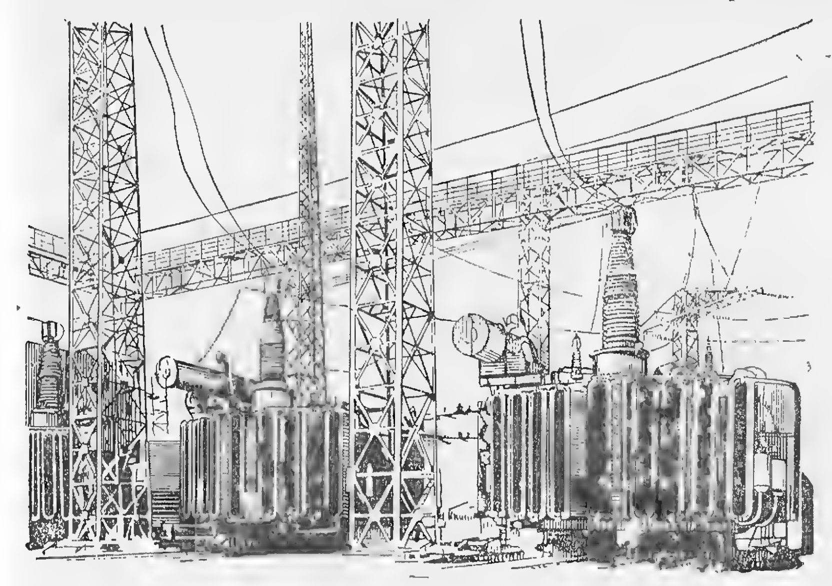
Особой задачей является также расчет механических сил в обмотках и расчет добавочных потерь. С ростом мощности механические силы при коротких замыканиях и добавочные потери возрастают и могут достигнуть недопустимо высоких значений.

Важной задачей является обеспечение интенсивного и надежного охлаждения. Наибольшее распространение в настоящее время получила дутьевая система охлаждения. Основная часть тепла отдается через трубчатые радиаторы в окружающий воздух. Интенсивное охлаждение радиаторов обеспечивается вентиляторами. Радиаторы могут быть расположены непосредственно на баке или устанавливаются отдельно в виде батарей, связанных общим коллектором. В последнем случае циркуляция масла может осуществляться специальным насосом. Подбор охлаждающей поверхности выполняется, исходя из возможности работы при отключенной системе дутья с нагрузкой, равной 60% от номинальной, что повышает экономичность трансформатора в эксплуатации.

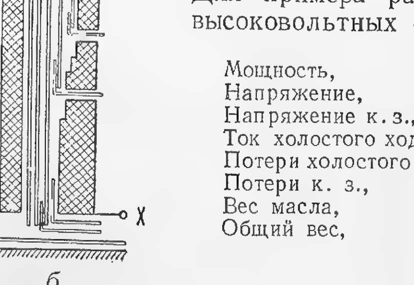
В мощных трансформаторах в качестве охлаждающего агента может также служить вода, охлаждающая масло. Циркуляционная



схема охлаждения позволяет значительно улучшить теплоотдачу и снизить вес трансформатора, но требует больших затрат.



*а*




*б*

Рис. 158. Мощный высоковольтный трансформатор: *а* — общий вид, *б* — схема расположения обмоток.

Все трансформаторы средних и больших мощностей в настоящее время снабжаются термосифонными фильтрами, что обеспечивает непрерывную очистку масла и снижает эксплуатационные затраты.

Применение новых материалов и улучшение конструкции может принести громадный эффект. Для примера рассмотрим данные двух мощных высоковольтных однофазных трансформаторов:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Мощность, | *ква* | 123 500 | 115 000 |
| Напряжение, | *в* | 400 | 370 |
| Напряжение к. з., | % | 12,95 | 10,8 |
| Ток холостого хода, | % | 3,16 | 2,1 |
| Потери холостого хода, | *квт* | 454 | 272 |
| Потери к. з., | *квт* | 404 | 468 |
| Вес масла, | *т* | 84 | 37 |
| Общий вес, | *т* | 297 | 188 |

Значительный выигрыш, полученный во втором трансформаторе, объясняется применением высококачественной стали, некоторым снижением изоляционных расстояний и повышением удельных нагрузок.

## Пример расчета трансформатора

Исходные данные:

$$P = 3200\ \text{ква};\quad m = 3;\quad U_{л1} = 35\ \text{кв} \pm 5\%;$$
$$U_{л2} = 6\ \text{кв};\quad f = 50\ \text{гц}.$$

Так как задан нормальный понижающий трансформатор, то согласно ГОСТ 401—41 выбираем $u_к = 7\%$ и $\eta = 98{,}51\%$ при $\cos\varphi = 1$.

Схема соединения Y/△ — 11. Охлаждение — естественное масляное. Сталь Э43 толщиной 0,5 *мм*. Соотношение потерь $\xi = 3{,}5$.

$$U_1 = \frac{U_{л1}}{\sqrt{3}} = \frac{35000}{\sqrt{3}} = 20210\ в;\quad U_2 = U_{л2} = 6000\ в.$$

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}\,U_{л1}} = \frac{3200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 52{,}8\ а;\quad I_2 = \frac{P}{3U_2} = \frac{3200 \cdot 10^3}{3U_2} = \frac{3200 \cdot 10^3}{3 \cdot 6000} = 177{,}7\ а.$$

$$\Sigma p = \frac{1-\eta}{\eta} P = \frac{0{,}0149}{0{,}9851} 3200 = 48{,}5\ квт;\ \Sigma p\% = 1{,}51\%.$$

$$p_{Cu} = \Sigma p \frac{\xi}{1+\xi} = 48{,}5 \frac{3{,}5}{4{,}5} = 37{,}3\ квт;\quad p_{Fe} = \frac{\Sigma p}{1+\xi} = \frac{48{,}5}{4{,}5} = 10{,}77\ квт.$$

Предварительный расчет*.

1. а) $D = 16{,}3 \dfrac{\sqrt{1.5}}{1{,}51} \dfrac{4{,}5}{\sqrt{3{,}5}} \sqrt{\dfrac{0{,}2 \cdot 0{,}75}{0{,}15 \cdot 0{,}79}} = 36{,}5\ см;$

б) $D \approx 0{,}85 \sqrt[4]{3200 \cdot 10^3} = 36\ см.$

Принято $\varphi_{Cu} \approx 0{,}15$ (рис. 151); $\varphi_{Fe} \approx 0{,}79$.

2. $S_{Fe} = \dfrac{\pi}{4} D^2 \varphi_{Fe} = \dfrac{\pi}{4} 36^2 \cdot 0{,}79 = 806\ см^2.$

Согласно табл. 33 выбираем $n = 6$, что соответствует $k_ф = 0{,}92$. Для принятой стали с бумажной изоляцией $k_п = 0{,}875$. Учет одного продольного канала дает

$$k_ф = 0{,}92 - 0{,}016 = 0{,}904;\quad \varphi_{Fe} = k_п k_ф = 0{,}875 \cdot 0{,}904 \doteq 0{,}79.$$

3. $\varPhi = BS_{Fe} = 1{,}45 \cdot 10^{-4} \cdot 806 = 0{,}117\ вб.$

Индукция выбрана по табл. 32.

4. $u_р = \sqrt{u_к^2 - u_а^2} = \sqrt{7^2 - 1{,}18} = 6{,}9\%$, где $u_а = p_{Cu}\% = 1{,}18\%$.

$$5.\ b_1 + b_2 = \sqrt{(1{,}5\delta_{12})^2 + \frac{6{,}55 u_р}{k_R \varphi'_{Cu} u_а}} - 1{,}5\delta_{12} =$$
$$= \sqrt{(1{,}5 \cdot 2{,}7)^2 + \frac{6{,}55 \cdot 6{,}9}{0{,}9 \cdot 0{,}45 \cdot 1{,}18}} - 1{,}5 \cdot 2{,}7 = 6{,}5\ см.$$

Принято: $\delta_{12} = 2{,}7$ (табл. 24); $k_R \approx 0{,}9$; $\varphi'_{Cu} \approx 0{,}45$.

Проверка по табл. 35 дает $b_1 + b_2 = 6 \div 8\ см.$

6. $l_0 = 2(b_1 + b_2 + \delta_{12} + \delta_{02}) + \delta_{11} = 2(6{,}5 + 2{,}7 + 1{,}5) + 3 = 24{,}4\ см$; $\delta_{02} = 1{,}5\ см$; $\delta_{11} = 3\ см$ (табл 24).

7. Проверка на минимум расхода материала

$$\delta'' = \delta' k_R \frac{l_s}{H} \approx \delta' = \delta_{12} + \frac{1}{3}(b_1 + b_2) = 2{,}7 + \frac{1}{3} 6{,}5 = 4{,}87\ см.$$

---

* Нумерация пунктов соответствует таковой в методике, § 9-4.



$$\varPhi_1 = \sqrt{\frac{\mu_0 \sqrt{2}\delta'' a\pi}{2u_р}} = \sqrt{\frac{1{,}26 \cdot 10^{-8} \sqrt{2} \cdot 4{,}87 \cdot 4800 \cdot \pi}{2 \cdot 0{,}069}} = 0{,}976\ вб.$$

$$a = \frac{P}{m\pi\sqrt{2}f} = \frac{3200 \cdot 10^3}{3\pi\sqrt{2}\,50} = 4800.$$

$$S_{Fe_1} = \frac{\varPhi_1}{B} = \frac{0{,}0976}{1{,}45 \cdot 10^{-4}} = 673\ см^2.$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}} \frac{\varPhi_1}{B}} = \sqrt{\frac{4}{\pi 0{,}79} \frac{0{,}0976}{1{,}45 \cdot 10^{-4}}} = 33\ см.$$

$$\lambda_1 = \frac{l_0}{2D_1} = \frac{24{,}4}{2 \cdot 33} = 0{,}37$$

и

$$c_1 = \frac{l'_{Fe}}{D_1} = \frac{p_{Fe}}{k_{Fe} B^2 S_{Fe} \gamma_{Fe} m D_1} = \frac{10770}{1{,}5 \cdot 10^8 (1{,}45 \cdot 10^{-4})^2\, 673 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 33} = 6{,}76.$$

По табл. 31 $x = 1{,}43$,

$$\varPhi = x\varPhi_1 = 1{,}43 \cdot 0{,}0976 = 0{,}14\ вб.$$

Сечение и диаметр

$$S_{Fe} = \frac{\varPhi}{B} = \frac{0{,}14}{1{,}45 \cdot 10^{-4}} = 966\ см^2;$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi\varphi_{Fe}} S_{Fe}} = \sqrt{\frac{4}{\pi 0{,}79} 966} = 39{,}5\ см.$$

Дальнейший расчет показывает, что при условиях задания при этом диаметре затрудняется размещение обмоток в окне ввиду значительного уменьшения высоты стержня. Поэтому останавливаемся пока на $D = 36\ см$.

8. $l'_{Fe} = \dfrac{p_{Fe}}{k_{Fe} B^2 S_{Fe} \gamma_{Fe} m} = \dfrac{10770}{1{,}5 \cdot 10^8 (1{,}45 \cdot 10^{-4})^2\, 806 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 3} = 186\ см,$

где $k_{Fe} = p_{10} \cdot 10^8 = 1{,}5 : 10^{-8}$; для стали Э43 $p_{10} = 1{,}5\ вт/кг$; $\gamma_{Fe} = 7{,}6 \cdot 10^{-3}\ кг/см^3$.

Проверка $l'_{Fe}$ на оптимальные соотношения:

$$l'_{Fe} = (4{,}5 \div 5{,}5)\,D = (4{,}5 \div 5{,}5) \cdot 36 = 162 \div 198\ см.$$

Полученное значение $l'_{Fe} = 186\ см$ близко к оптимальному.

9. $l_s = l'_{Fe} - \left(1{,}8D + \dfrac{m+1}{3} l_0\right) = 186 - (1{,}8 \cdot 36 + 1{,}33 \cdot 24{,}4) = 89\ см.$

Проверяем $\alpha = \dfrac{l_s}{D} = \dfrac{89}{36} = 2{,}47$ близко к $\alpha_{опт} = 2{,}6$.

10. $H = l_s - 2a_{01} = 89 - 2 \cdot 7{,}5 = 74\ см$; $a_{01}$ по табл. 24.

11. $l_w = \pi(D + \Delta) = \pi(36 + 12{,}2) = 151\ см$; $\Delta = 2\delta_{02} + b_1 + b_2 + \delta_{12} = 2 \cdot 1{,}5 + 6{,}5 + 2{,}7 = 12{,}2\ см.$

12. $Iw = \dfrac{P}{m\pi\sqrt{2}f\varPhi} = \dfrac{3200 \cdot 10^3}{3\pi\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0{,}117} = 41400\ а.$

13. $s = \dfrac{p_{Cu}}{2mIwl_w\rho} = \dfrac{37700}{2 \cdot 3 \cdot 41400 \cdot 151 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-6}} = 460\ а/см^2.$

Проверяем по табл. 32 и по формуле (34) — допустимо.

14. $e_w = \pi\sqrt{2}f\varPhi = \pi\sqrt{2}\,50 \cdot 0{,}117 = 26\ в.$

15. $w_1 = \dfrac{U_1}{e_w} = \dfrac{20210}{26} = 778$; $w_2 = \dfrac{6000}{26} = 231$; $w_{1\,max} = 1{,}05 w_1 = 1{,}05 \cdot 778 = 817.$

16. $q_1 = \frac{I_1}{s} = \frac{52,8}{4,6} = 11,45$ *мм²*; $q_2 = \frac{177,7}{4,6} = 38,6$ *мм²* (уточняем впоследствии по стандарту).

17. Выбираем для ВН и НН непрерывную обмотку из прямоугольной меди.

18. $\beta = \frac{w}{10s^2} = \frac{1600}{10\cdot 4,6^2} = 7,58$ *мм*; $w$ по табл. 36.

19. $$4S'_{Cu} = 2H\frac{\beta}{\beta+\delta_к+\Delta_i}(b_1+b_2)k_u = 2\cdot 74\,\frac{7,58\cdot 6,5\cdot 0,8}{7,58+5+0,5} = 446\ см^2;$$

$\delta_к = 5$ *мм* (табл. 38); $\Delta_i = 0,5$ *мм* (табл. 25); $k_u = 0,8$.

20. $4S_{Cu} = \frac{4Iw}{s} = \frac{4\cdot 41\,400}{460} = 358\ см^2 < 446\ см^2$, т. е. размещение меди в окне возможно.

21. $$u_р = \frac{\sqrt{2}\,\mu_0 I w l_w \delta' k_R}{\Phi H} = \frac{\sqrt{2}\,1,26\cdot 10^{-8}\cdot 41\,400\cdot 151\cdot 4,87\cdot 0,96}{0,117\cdot 74} = 0,0586;$$

$$k_R = 1-\frac{\delta_{12}+b_1+b_2}{\pi H} = 1-\frac{2,7+6,5}{\pi 74} = 0,96;$$

$$\delta' = \delta_{12}+\frac{1}{3}(b_1+b_2) = 2,7+\frac{1}{3}6,5 = 4,87\ см.$$

Задано $u_р = 0,069$.

Для увеличения $u_р$ принимаем $D = 37,5$ *см*. Этот диаметр также более удобен по условиям раскроя.

22. Окончательный расчет и размещение обмоток *.

$$D = 37,5\ см;\ S_{Fe} = 806\left(\frac{37,5}{36}\right)^2 = 870\ см^2;$$

$$\Phi = BS_{Fe} = 1,45\cdot 10^{-4}\cdot 870 = 0,126\ вб;\ l'_{Fe} = 186\,\frac{806}{870} = 172\ см;$$

$$l_s = 172 - (1,8\cdot 37,5 + 1,33\cdot 24,4) = 72\ см;\ H = l_s - 2a_{01} = 72 - 2\cdot 7,5 = 57\ см;$$

$$l_w = \pi(D+\Delta) = \pi(37,5+12,2) = 156\ см;\ Iw = 41\,400\,\frac{0,117}{0,126} = 38\,100\ а;$$

$$s = 4,6\,\frac{41\,400}{38\,100}\,\frac{151}{156} = 4,83\ а/мм^2;$$

$$u_р = 5,86\,\frac{38\,100}{41\,400}\,\frac{0,117}{0,126}\,\frac{74}{57}\,\frac{156}{151} = 6,72\%;$$

$$e_w = 26\,\frac{0,126}{0,117} = 28\ в;$$

$$w_1 = \frac{U_1}{e_w} = \frac{20\,210}{28} = 723;\quad w_2 = \frac{U_2}{e_w} = \frac{6000}{28} = 214.$$

В обмотке высшего напряжения предусматривается 5% добавочных регулировочных витков

$$w_{1max} = 1,05w_1 = 723 + 36 = 759.$$

Исходя из мощности, напряжений и токов, выбираем для ВН и для НН непрерывную обмотку.

Приступаем к размещению обмотки ВН.

Допустимый осевой размер одной катушки обмотки по условиям охлаждения

$$\beta = \frac{w}{10s^2} = \frac{1600}{10\cdot 4,83^2} = 6,87\ мм.$$

Выбираем согласно сортамента (приложение III) провод ПББО с $q_1 = 6,9\times 1,56 = 10,6$ *мм²* и с толщиной изоляции на две стороны 0,45 (0,5) *мм*. Тогда $h' = 6,9 + 0,5 = 7,4$ *мм*; $b' = 1,56 + 0,5 = 2,06$ *мм*; $s_1 = \frac{I_1}{q_1} = \frac{52,8}{10,6} = 4,98$ *а/мм²*.

---

* См. соответствующие пункты предварительного расчета.



Ширина масляного канала между катушками $\delta_к = 5,5$ *мм* (табл. 38). Число катушек, которые можно расположить на высоте $H$,

$$K_1 \leqslant \frac{H}{h'+\delta_к} = \frac{570}{7,4+5,5} = 44,2.$$

Выбираем 44 катушки (четное число) с числом витков в катушке

$$w_{к_1} = \frac{w_{1max}}{K_1} = \frac{759}{44} = 17,23.$$

Для удобства размещения регулировочных витков в отдельных катушках и усиления изоляции крайних катушек принимаем $w_{к_1} = 18$.

Радиальный размер катушки

$$b_1 = w_{к_1}b' = 18\cdot 2,06 = 37,1\ мм.$$

Четыре крайние катушки выполняются с усиленной изоляцией 1,35 (1,4) *мм* на 2 стороны. Число витков в крайних катушках $w'_к = 12$; радиальный размер $b_1 = 12\,(1,56 + 1,4) = 35,6$ *мм*.

Полное число витков

$$w_1 = 4\cdot 12 + 36\cdot 18 + 4\cdot 16 = 760.$$

Таким образом, в обмотке имеется 3 типа катушек: крайние, промежуточные (из них 4 регулировочные) и 4 катушки по 16 витков. Радиальный размер последних при помощи картонных прокладок доводится до 37 *мм*.

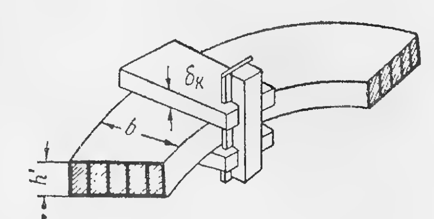



Рис. 159. Катушка обмотки НН: $\delta_k$ — толщина дистанционной прокладки; $b$ — ширина катушки; $h'$ — высота катушки.

Схема регулировки выбирается согласно рис. 150 с разрывом посредине. Разрыв между регулировочными катушками 15 *мм*.

Высота обмотки

$$H = 4\,(6,9 + 1,4) + 40\,(6,9 + 0,5) + (4\cdot 7 + 38\cdot 5,5 + 15)\,0,95 = 56,92\ см.$$

Каналы между катушками с усиленной изоляцией (7 *мм*); коэффициент 0,95 учитывает усадку изоляции после сушки и опрессовки обмотки.

Принимаем $H = 57$ *см*.

Обмотка НН. Выбираем согласно сортамента провод ПББО 2 [6,9×2,83] = 2 · 19 *мм²*.

Две параллельные ветви выбираются ввиду неудобства намотки проводом, имеющим почти квадратное сечение. Толщина изоляции — 0,45 (0,5) *мм* на 2 стороны; $h' = 7,4$ *мм* (рис. 159).

Плотность тока

$$s_2 = \frac{I_2}{q_2} = \frac{177,7}{2\cdot 19} = 4,68\ а/мм^2.$$

Приближенно число катушек

$$K_2 \leqslant \frac{H}{h'+\delta_к} = \frac{570}{7,4+5} = 46.$$

Число витков в катушке

$$w_{к_2} = \frac{w_2}{K_2} = \frac{214}{46} = 4,66.$$

Так как в непрерывной обмотке желательно иметь четное число катушек, то выбираем обмотку, имеющую: 30 катушек по 5 витков с радиальным размером 5 (2,83+0,5) 2 = 33,3 *мм* и 16 катушек по 4 витка с радиальным размером 4 (2,83 + 0,5) 2 = 26,65 *мм*.

Полное число витков

$$w_2 = 30\cdot 5 + 16\cdot 4 = 214.$$

В средней части обмотки между катушками 22—23—24—25 делаем разгон витков, увеличивая каналы до 10 *мм*, что уменьшает асимметрию обмоток, созданную регулировочными витками.

Высота обмотки

$$H = 46\,(6{,}9 + 0{,}5) + (42 \cdot 5 + 3 \cdot 10)\,0{,}95 = 568 \text{ мм}.$$

Радиальные размеры обмоток представлены на рис. 160.

23. $D_2 = D + 2\delta_{02} + b_2 = 37{,}5 + 2 \cdot 1{,}5 + 3{,}3 = 43{,}8$ *см*;

$$D_1 = D + 2\delta_{02} + 2b_2 + 2\delta_{12} + b_1 = 37{,}5 + 2 \cdot 1{,}5 + 2 \cdot 3{,}3 + 2 \cdot 2{,}7 + 3{,}7 = 56{,}2 \text{ см};$$

$$l_{w_2} = \pi D_2 = \pi \cdot 43{,}8 = 137{,}5 \text{ см};$$

$$l_{w_1} = \pi D_1 = \pi 56{,}2 = 176{,}5 \text{ см};$$

$$G_{Cu_2} = q_2 w_2 l_{w_2} m\gamma_{Cu} = 2 \cdot 0{,}19 \cdot 214 \cdot 137{,}5 \cdot 3 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 298 \text{ кг};$$

$$G_{Cu\,1\max} = q_1 w_1 l_{w_1} m\gamma_{Cu} = 0{,}106 \cdot 760 \cdot 176 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 379 \text{ кг};$$

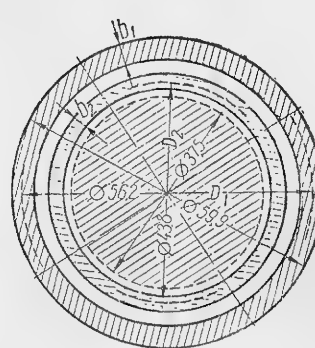



Рис. 160. Радиальные размеры обмоток.

$$G_{Cu} = G_{Cu_1} + G_{Cu_2} = 298 + 379 = \mathbf{677} \text{ кг}; \quad g_{Cu} = \frac{677}{3200} = 0{,}212 \text{ кг/ква}.$$

24. $p_{Cu} = 2{,}4 s_2^2 G_{Cu_2} = 2{,}4 \cdot 4{,}68^2 \cdot 298 = 15650$ *вт*;

$$p_{Cu_1} = 2{,}4\, s_1^2 G_{Cu_1} = 2{,}4 \cdot 4{,}98^2 \frac{379}{1{,}05} = 21400 \text{ вт};$$

$$p_{Cu} = p_{Cu_1} + p_{Cu_2} = 15650 + 21400 = 37050 \text{ вт}.$$

Расчет потерь ведется по числу витков, соответствующему номинальному напряжению,

$$k_{r2} = 1 + h^4 \left(\frac{H_{Cu}}{H} k_R\right)^2 \frac{m^2 - 0{,}2}{9} = 1 + 0{,}283^4 \left(\frac{46 \cdot 0{,}69}{57}\, 0{,}96\right)^2 \frac{10^2 - 0{,}2}{9} = 1{,}017,$$

где $m = 10$ — число проводников в катушке;

$$k_{r1} = 1 + 0{,}156^4 \left(\frac{44 \cdot 0{,}69}{57}\, 0{,}96\right)^2 \frac{18^2 - 0{,}2}{9} = 1{,}006.$$

$$p_{к_2} = p_{Cu_2} k_{r_2} = 15650 \cdot 1{,}017 = 15900 \text{ вт};$$

$$p_{к_1} = p_{Cu_1} k_{r1} = 21400 \cdot 1{,}006 = 21530 \text{ вт};$$

$$p_к = p_{к_1} + p_{к_2} = 21530 + 15900 = \mathbf{37430} \text{ вт}.$$

Задано было 37 700 *вт*.

25. $u_a = \dfrac{p_к}{P} = \dfrac{37\,430 \cdot 10^{-3}}{3200} = 0{,}0117$ (1,17%);

$$u_p = \frac{\sqrt{2}\,\mu_0 I_w l_w \delta' k_R}{\Phi H} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 38100 \cdot 157 \cdot 5{,}03 \cdot 0{,}9457}{0{,}126 \cdot 57} = \mathbf{0{,}0705},$$

где

$$l_w = \frac{l_{w_1} + l_{w_2}}{2} = \frac{137{,}5 + 176{,}5}{2} = 157 \text{ см};$$

$$\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3} = 2{,}7 + \frac{3{,}3 + 3{,}7}{3} = 5{,}03 \text{ см};$$

$$k_R = 1 - \sigma = 1 - \frac{\delta_{12} + b_1 + b_2}{\pi H} = 1 - \frac{2{,}7 + 3{,}3 + 3{,}7}{\pi\, 57} = 0{,}9457.$$

$$u_к = \sqrt{0{,}0705^2 + 0{,}0117^2} = 0{,}0712 \; (7{,}12\%).$$



Было задано $u_к = 0{,}07$; расхождение допустимо.

26. $l_s = H + 2a_{01} = 57 + 2 \cdot 7{,}5 = \mathbf{72}$ *см*.

Сечение сердечника с 6 ступенями при наличии сегментов для запрессовки по 19 *мм*

$$\begin{aligned} 2 \times 16{,}4 \times 1{,}1 &= 36{,}0 \\ 2 \times 20{,}5 \times 2{,}2 &= 90{,}2 \\ 2 \times 26{,}0 \times 2{,}0 &= 104{,}0 \\ 2 \times 29{,}5 \times 3{,}7 &= 218{,}0 \\ 2 \times 34{,}0 \times 4{,}1 &= 279{,}0 \\ 36{,}8 \times (7{,}4 - 0{,}6) &= 250{,}0 \\ \hline S &= 977{,}2 \text{ см}^2 \end{aligned}$$

$$S_{Fe} = Sk_п = 977{,}2 \cdot 0{,}875 = \mathbf{886} \text{ см}^2.$$

В среднем пакете оставлен продольный масляный канал шириной 6 *мм*. Сечение ярма выбираем Т-образное с уступом вверх и несколько усиленное (на 5%) по сравнению с сечением сердечника. Ширина ярма $b_j = 33{,}6$ *см*.

Сечение железа ярма

$$S_j = 1025 \cdot 0{,}875 = 898 \text{ см}^2.$$

27. $G_s = mS_{Fe} l_s \gamma_{Fe} = 3 \cdot 866 \cdot 72 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 1420$ *кг*.

$$G_j = 2S_j l_j \gamma_{Fe} = 2 \cdot 898 \cdot 155{,}5 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 2123 \text{ кг},$$

где

$$l_j = (m - 1)(l_0 + D) + \frac{S_{Fe}}{b_j k_п} = (3 - 1)(25{,}5 + 37{,}5) + \frac{866}{33{,}6 \cdot 0{,}875} = 155{,}5 \text{ см};$$

$$l_0 = 2(\delta_{02} + b_1 + b_2 + \delta_{12}) + \delta_{11} = 2(1{,}5 + 3{,}71 + 3{,}33 + 2{,}7) + 3{,}01 = 25{,}5 \text{ см}.$$

$$G_{Fe} = G_s + G_j = 1420 + 2123 = \mathbf{3543} \text{ кг};$$

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P} = \frac{3543}{3200} = 1{,}108 \frac{кг}{ква}.$$

28. $B_s = \dfrac{\Phi}{S_{Fe}} = \dfrac{0{,}126}{866} = 1{,}455 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*;

$p'_s = 3{,}14$ *вт/кг*; $w'_s = 34{,}4$ *ва/кг*; $w'_{Ст} = 3{,}00$ *ва/см²*.

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} = \frac{0{,}126}{898} = 1{,}402 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2;$$

$p'_j = 2{,}96$ *вт/кг*; $w'_j = 26{,}3$ *ва/кг*.

$$p_{Fe} = p'_s G_s + p'_j G_j = 3{,}14 \cdot 1420 + 2{,}96 \cdot 2123 = \mathbf{10750} \text{ вт}.$$

Задана величина потерь $p = 10\,770$ *вт*.

29. $I_{0a} = \dfrac{p_{Fe}}{P} = \dfrac{10750}{3200} 10^{-3} = 0{,}00336$;

$$I_{0p} = \frac{w'_s G_s + w'_j G_j + S_{Fe} n w'_{ст.}}{P} = \frac{34{,}4 \cdot 1420 + 26{,}3 \cdot 2123 + 866 \cdot 7 \cdot 3{,}00}{3200 \cdot 10^3} = 0{,}0384;$$

$$I_0 = \sqrt{0{,}00336^2 + 0{,}0384^2} = 0{,}0385.$$

30. $$\eta = 100 - \frac{\alpha^2 p_к + p_{Fe}}{\alpha P \cos\varphi + \alpha^2 p_к + p_{Fe}}\,100 = 100 - \frac{(37\,430 + 10\,750)\,100}{3200 \cdot 10^3 + 37\,443 + 10750} = 98{,}5\%,$$

где $\alpha = 1$; $\cos\varphi = 1$. Задано $\eta = 98{,}51\%$.

31. $\Delta u = u_а \cos\varphi_2 + u_р \sin\varphi_2 + \frac{(u_р \cos\varphi_2 - u_а \sin\varphi_2)^2}{200} =$

$$= 1{,}17 + \frac{7{,}05^2}{200} = 1{,}42\%,$$

где $a = 1$; $\cos\varphi_2 = 1$; $\sin\varphi_2 = 0$.

Тепловой расчет. Плотности теплового потока:

а) в обмотке *ВН*.

Поверхность охлаждения одиночной катушки

$$S'_к = 2l_{w_1}(h' + b_1)\,k_з \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 176{,}5\,(0{,}74 + 3{,}7)\,0{,}795 \cdot 10^{-4} = 0{,}125\ м^2,$$

где $k_з$ — коэффициент закрытия

$$k_з \approx \frac{l_w - na}{l_w} = \frac{176{,}5 - 12 \cdot 3}{176{,}5} = 0{,}795;$$

$n$ — число прокладок;

$a$ — ширина прокладки.

Удельная тепловая нагрузка

$$w = \frac{p_{к_1}}{S_{об_1}} = \frac{22\,530}{3 \cdot 42 \cdot 0{,}125} = 1365\ вт/м^2.$$

Число катушек на фазу взято 42 с учетом отключения двух регулировочных катушек;

б) в обмотке *НН*.

$$S'_к = 2l_{w_2}(h'_2 + b_2)\,k_з \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 137{,}5\,(0{,}74 + 3{,}3)\,0{,}74 \cdot 10^{-4} = 0{,}0822\ м^2,$$

где $k_з = \frac{137{,}5 - 12 \cdot 3}{137{,}5} = 0{,}74$; $n = 12$; $a = 3\ см$.

$$w = \frac{p_{к_2}}{S_{об_2}} = \frac{15900}{3 \cdot 46 \cdot 0{,}0822} = 1405\ вт/м^2;$$

в) в сердечнике

$$S_s = m\Pi_s l_s k_з \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 214{,}4 \cdot 72 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-4} = 3{,}7\ м^2,$$

где $\Pi_s$ — периметр сердечника с учетом охлаждающих каналов

$$\Pi_s = 2 \cdot (36{,}8 + 36{,}8 + 33{,}6) = 214{,}4\ см.$$

$$w = \frac{p_s}{S_s} = \frac{4460}{3{,}7} = 1205\ вт/м^2;$$

г) в ярме

$$S_j = 2\Pi_j l_j k_з 10^{-4} = 2 \cdot 203{,}2 \cdot 155{,}5 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-4} = 5{,}05\ м^2,$$

где

$$\Pi_j = 2\,(33{,}6 + 34 + 34) = 203{,}2\ см^2.$$

$$w = \frac{p_j}{S_j} = \frac{6290}{5{,}05} = 1245\ вт/м^2.$$

Перепад температуры:

а) в изоляции катушек *ВН*

$$\theta_i = \frac{w\Delta_i a'}{k_i(a' + a)} = \frac{1365 \cdot 0{,}045 \cdot 2{,}01 \cdot 10^{-4}}{0{,}0016\,(2{,}01 + 1{,}56)} = 2{,}16°\ С,$$

где $\Delta_i = 0{,}045\ см$ — толщина изоляции (на 2 стороны);

$k_i$ — коэффициент теплопроводности изоляции; для бумажной изоляции, пропитанной маслом, $k_i = 0{,}0016\ вт/см°\ С$;

$a$ и $a'$ — охлаждаемая сторона проводника голая и с изоляцией;

б) в изоляции катушек обмотки *НН*

$$\theta_i = \frac{w\Delta_i a'}{k_i(a' + a)} = \frac{1405 \cdot 0{,}045 \cdot 3{,}28 \cdot 10^{-4}}{0{,}0016\,(3{,}28 + 2{,}83)} = 2{,}12°\ С;$$



в) на поверхности обмотки *ВН*

$$\theta_м = k_1 \cdot k_2 \cdot 0{,}35\, w^{0,6} = 1 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}35 \cdot 1365^{0,6} = 22{,}1°\ С;$$

г) на поверхности обмотки *НН*

$$\theta_м = 1{,}1 \cdot 0{,}85 \cdot 1405^{0,6} = 0{,}35 = 25{,}5°\ С.$$

Выбор и расчет бака. Размеры бака можно установить, зная размеры выемной части и необходимые изоляционные расстояния (см. табл. 40). Размеры выемной части 188 × 60 × 142 *см*. Бак овальной формы. Минимальные размеры бака в плане 206 × 85 *см*. Высота трансформатора определяется, исходя из условий размещения радиаторов, переключателей и т. п. конструктивных элементов. Применив радиаторы согласно приложению VIII с наименьшим межосевым расстоянием, минимальная высота бака составит 1880 + 345 = = 2225 *мм*.

В трансформаторах I — III габаритов обычно применяют переключатели, установленные непосредственно на крышке бака, хотя для некоторых моделей было бы желательно укрепление переключателя на уровне обмоток.

Применив переключатель типа ПСС-42120/35 × 3 (строенный переключатель с сегментным контактом), установленный на крышке бака, и учтя установку выемной части на прокладках, получаем минимальную высоту бака в этом случае 2420 *мм*.

Для этой высоты годятся охладители с межцентровым расстоянием 2000 *мм*. Бак сварен из листовой стали толщиной 6 *мм*, дно и крышка — 8 *мм*. Для того чтобы наиболее нагретая часть (обмотка *НН*) не нагрелась выше допустимой температуры, средний перепад температуры от масла к воздуху не должен превышать

$$\theta_{м.\,в} = \theta_{доп} - \theta_м - \vartheta_i = 70 - 25{,}5 - 2{,}12 = 42{,}38°С.$$

При этом средний тепловой поток на эффективной поверхности бака должен быть

$$w \leqslant \left(\frac{\theta_{м.\,в}}{0{,}262}\right)^{\frac{1}{0,8}} = \left(\frac{42{,}38}{0{,}262}\right)^{\frac{1}{0,8}} = 575\ вт/м^2.$$

Эффективная поверхность

$$S_{эф} \geqslant \frac{1{,}05\Sigma p}{w_б} = \frac{1{,}05 \cdot 48180}{575} = 88\ м^2.$$

Поверхность теплоотдачи овального бака

$$S_{б.\,эф} = \Pi_б H_б + 0{,}75 S_{кр} = 242\,[2\,(206 - 85) + \pi\,85]\,10^{-4} +$$

$$+ 0{,}75\left[85\,(206 - 85) + \frac{\pi}{4}85^2\right]10^{-4} = 13{,}5\ м^2.$$

Необходимая эффективная поверхность охладителей

$$S_{тр.\,эф} \geqslant S_{эф} - S_{б.\,эф} = 88 - 13{,}5 = 74{,}5\ м^2.$$

Выбрав двухрядные трубчатые охладители, определяем необходимую полную поверхность

$$S_{охл} \geqslant \frac{S_{тр.\,эф}}{k} = \frac{74{,}5}{0{,}754} = 98{,}8\ м^2,$$

где $k$ — согласно табл. 41.

Для получения необходимой поверхности применяем 4 сдвоенных охладителя и 1 одинарный.

Габариты трансформатора в плане: 2722 × 3502 (угольник под крышку 70 × 70 × 10).

Поверхность охладителей

$$S_{охл} = 4 \cdot 24{,}2 + 12{,}3 = 109{,}1\ м^2.$$

Эффективная поверхность

$$S_{тр.\ эф} = kS_{охл} = 0{,}754 \cdot 109{,}1 = 82{,}2\ м^2.$$

Средний перегрев масла над воздухом

$$\theta_{м.\ в} = 0{,}262\left(\frac{1{,}05\Sigma p}{S_{б.\ эф} + S_{тр.\ эф}}\right)^{0{,}8} = 0{,}262\left(\frac{1{,}05 \cdot 48180}{13{,}5 + 82{,}2}\right)^{0{,}8} = 39{,}7°С.$$

Перегрев обмотки $ВН$ над воздухом

$$\theta_{ВН} = \theta_{м.\ в} + \theta_м + \theta_i = 39{,}7 + 22{,}1 + 2{,}16 = 63{,}96 \approx 64°\ С.$$

Перегрев обмотки $НН$ над воздухом

$$\theta_{НН} = 39{,}7 + 25{,}5 + 2{,}12 = 67{,}32°\ С,$$

Перегрев масла в верхних слоях

$$\theta \approx 1{,}2\theta_{м.\ в} = 1{,}2 \cdot 39{,}7 = 47{,}6°\ С.$$

Все перегревы в пределах нормы.

Механический расчет 1. Радиальная сила

$$F_R = \frac{10{,}2}{2\pi f}\frac{P}{m}\frac{k_A^2}{u_к}\left(\frac{1}{\delta'} + \frac{2}{D_1 + D_2}\right) = \frac{10{,}2}{2\pi\, 50}\,\frac{3200 \cdot 10^3}{3}\,\frac{1{,}594^2}{0{,}0712}\left(\frac{1}{5{,}03} + \frac{2}{56{,}2 + 43{,}8}\right) = 270\,000\ кг,$$

где

$$k_A = 1 + e^{-\pi\frac{u_а}{u_р}} = 1 + e^{-\pi\frac{0{,}0117}{0{,}0705}} = 1{,}594.$$

Проверка обмотки на прочность

$$\sigma_{max} = \frac{F_R}{2\pi\, w_1 q_1} = \frac{270\,000}{2\pi \cdot 728 \cdot 0{,}106} = 557\ кг/см^2 < 600\ кг/см^2.$$

2. Осевая сила для внутренней обмотки ($k = 1{,}4$)

$$F_i'' = \frac{k\delta'}{2H}F_R = \frac{1{,}4 \cdot 5{,}03}{2 \cdot 57}\,270\,000 = 16\,700\ кг.$$

В результате разгона витков в обмотке $НН$ усилием от несимметрии можно пренебречь. При отсутствии асимметрии расчет ярмовых соединений ведется только по условиям прессовки обмотки, во время которой необходимо создать усилия, достаточные для предотвращения деформации частей обмотки при коротком замыкании.

Для закрепления обмотки $НН$ при запрессовке размещаем по окружности 12 прокладок шириной 30 *мм* каждая. Напряжение в прокладках

$$\sigma_{max} = \frac{F_i''}{nab} = \frac{16\,700}{12 \cdot 3 \cdot 3{,}3} = 140\ кг/см^2.$$

3. Консоли. Расчет на прессовку.

$$M = \frac{ph_j L^2}{8} = \frac{1 \cdot 34 \cdot 63^2}{8} = 16\,900\ кгсм,$$

где $p$ — давление при запрессовке;
$h_j$ — высота ярма;
$L$ — расстояние между прессовочными шпильками (при 3 шпильках $L$ равно межосевому расстоянию).

Необходимый момент сопротивления

$$W_y \geqslant \frac{M}{\sigma} = \frac{16900}{1000} = 16{,}9\ см^3.$$



Выбираем швеллер № 22 $W_x = 257{,}3\ см^3$; $W_y = 36\ см^3$. Напряжение в шпильках ярма при подъеме выемной части с учетом напряжения от прессовки

$$\sigma = 0{,}187\frac{ph_j l_j}{S} + 2{,}5\frac{Gx}{d^3} \leqslant 1000\ кг/см^2,$$

где $G$ — вес выемной части

$$G \approx 1{,}2\,(G_{Cu} + G_{Fe}) = 1{,}2\,(677 + 3543) = 5060\ кг.$$

При расстоянии от ярма до консоли 2 *см* и шпильке диаметром $d = 4$ *см*

$$\sigma = 0{,}187\frac{1 \cdot 34 \cdot 155{,}5}{12{,}56} + 2{,}5\frac{5060 \cdot 2}{4^3} = 473{,}6\ кг/см^2.$$

Напряжение в изоляции шпильки при подъеме выемной части

$$\sigma = 0{,}25\frac{G}{db_j} = 0{,}25\frac{5060}{4 \cdot 33{,}6} = 9{,}42\ кг/см^2,$$

где $b_j$ — ширина ярма.

Напряжение в шпильках стержней (3 шпильки на стержень)

$$\sigma = 0{,}625\frac{pDl_s}{S} = 0{,}625\frac{1 \cdot 37{,}5 \cdot 72}{3 \cdot 1{,}13} = 498\ кг/см^2 < 1000\ кг/см^2.$$

Ставим в стержне 3 шпильки диаметром 1,2 *см* на расстоянии 24 *см*.

4. Объем выемной части

$$V = \frac{G}{\gamma_{в.\ ч}} = \frac{5060}{5{,}5} = 920\ дм^3.$$

5. Объем бака

$$V_б = 24{,}2 \cdot 160 = 3875\ дм^3.$$

6. Объем масла в баке

$$V_{м.\ б} = V_б - V = 3875 - 920 = 2955\ дм^3.$$

7. Вес масла в баке

$$G_{м.\ б} = \gamma_м V_{м.\ б} = 0{,}9 \cdot 2955 = 2660\ кг.$$

8. Вес масла в охладителях

$$G_{м.\ охл} = 4 \cdot 290 + 168 = 1328\ кг.$$

9. Полный вес масла

$$G_м = G_{м.\ б} + G_{м.\ охл} = 2660 + 1328 = 3988\ кг.$$

10. Полный объем масла

$$V_м = \frac{G_м}{\gamma_м} = \frac{3988}{0{,}9} = 4430\ дм^3.$$

11. Объем расширителя

$$V_р = 0{,}1V_м = 443\ дм^3.$$

*Глава десятая*

# МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 10-1. ОБЩАЯ И КОНСТРУКТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Области применения. Машины постоянного тока (генераторы и двигатели) выполняются для самых различных областей техники, но особенное распространение они нашли:

а) в металлургии — двигатели и генераторы для прокатных станов, привода рольгангов, механизмов доменных и мартеновских цехов;

б) в крановых и подъемных устройствах;

в) в электрической тяге — тяговые электродвигатели (электрическая железная дорога, трамвай, троллейбус).

Машины постоянного тока широко применяются также как:

а) возбудители турбо- и гидрогенераторов переменного тока;

б) дизель-генераторы;

в) нормальные (серийные) генераторы и двигатели общего применения;

г) специальные машины — генераторы для электролиза и гальванических покрытий, сварочные генераторы, двигатели и генераторы для обслуживания специальных механизмов, электромашинные усилители, преобразователи и т. п.

В зависимости от области применения машины может изменяться и ее конструктивный тип.

Электрическая машина постоянного тока характеризуется следующими основными данными:

а) мощностью (*вт*, *квт*, *л. с.*);

б) напряжением (*в*, *кв*);

в) силой тока (*а*);

г) скоростью (об/сек, об/мин);

д) типом выполнения (закрытый, защищенный, открытый);

е) графиком и характером нагрузки (продолжительная, кратковременная, повторно-кратковременная), пределами регулирования напряжения, тока и скорости вращения;



ж) типом возбуждения (параллельное, последовательное, смешанное).

Мощности. Машины постоянного тока имеют самую разнообразную мощность, начиная от долей киловатта до нескольких тысяч киловатт.

Маломощные машины относятся к области техники точного электромашиностроения и по конструктивному исполнению в значительной мере выходят за пределы нормальных соотношений.

Крупные машины изготовляются обыкновенно для привода мощных прокатных станов и питания приводных двигателей. Примером крупных машин постоянного тока, построенных в нашей стране, являются машины для блюминга (двигатели 7400 *квт* и генераторы для их питания 2 × 4000 *квт*).

Крупные машины выпускаются в порядке индивидуальных заказов или мелкими сериями. Машины малых и средних мощностей выпускаются крупными сериями. В настоящее время в Советском Союзе существует несколько серий машин постоянного тока; данные некоторых из них приводятся ниже.

Область специальных машин охватывает машины различных мощностей от долей киловатта до сотен киловатт. Вопросы расчета и конструирования этих машин требуют специального рассмотрения.

Получение больших мощностей в одной машине постоянного тока ограничивается конструктивными возможностями выполнения коллектора, так как условия коммутации позволяют снять с 1 *см*² поверхности коллектора в предельном случае 150—200 *вт* мощности. Поэтому машины постоянного тока не могут быть построены на такие же мощности, как синхронные машины переменного тока (50, 100, 200 *Мвт*), так как коллектор при этом имел бы недопустимо большие размеры. Однако существующие пределы мощности машин постоянного тока в большинстве случаев удовлетворяют запросам современной техники*.

Данные основных серий. *Серия* ПН:

1) электродвигатели: 0,25—200 *квт*; 500—2870 об/мин; 110, 220, 440 *в*;

2) генераторы: 0,37—130 *квт*; 970—2860 об/мин; 115, 115/160; 230; 230/320; 460 *в*.

Машины постоянного тока серии ПН могут быть использованы как электродвигатели и как генераторы и включают следующие типы: ПН-2,5; ПН-5; ПН-10; ПН-17,5; ПН-28,5; ПН-45; ПН-68; ПН-85; ПН-100; ПН-145; ПН-205; ПН-290; ПН-400; ПН-550; ПН-750; ПН-1000; ПН-1320; ПН-1750.

Электродвигатели выполняются защищенными (ПН) и закрытыми (ПНЗ), генераторы — только защищенными.

Цифры, стоящие после буквенных обозначений серий, показывают увеличенную примерно в 10 раз расчетную мощность машины в защищенном исполнении при 1450 об/мин для типов ПН-2,5—ПН-85 и при 950 об/мин для типов ПН-100 — ПН-1750. Если действитель-

* Здесь исключаются проблемы передачи энергии постоянным током.

ная скорость вращения машины отличается от расчетной, то и действительная мощность ее будет отличаться от типовой пропорционально изменению скорости вращения.

Так, двигатель типа ПН-17,5 на напряжение 220 *в* имеет четыре мощности (табл. 43) при различных скоростях вращения и расчетной мощности, равной 1,75 *квт*.

*Таблица 43*

**Характеристика двигателя типа ПН-17,5**

| Тип | Мощность (в *квт*) | Скорость вращения (об/мин) | Мощность, пересчитанная к 1450 (об/мин) |
|---|---|---|---|
| ПН-17,5 | 3,7 | 2850 | 1,88 |
| » | 2,7 | 2100 | 1,87 |
| » | 1,75 | 1450 | 1,75 |
| » | 1,0 | 1000 | 1,45 |

*Серия П* построена на 11 диаметрах якоря. Диапазон мощностей — 0,3—200 *квт*. Скорость вращения двигателей соответствует синхронным скоростям вращения генераторов переменного тока 3000, 1500, 1000, 750 и 600 об/мин, скорости вращения генераторов соответствуют скоростям асинхронных двигателей: для габаритов 1÷6—2850 об/мин, для габаритов 7÷11—1450 об/мин. Машины серии П выполнены защищенными и закрытыми. Закрытые машины выполняются как с обдувом наружной поверхности вентилятором, расположенным на консольном конце вала (тип ПО), так и с охлаждением внутреннего воздуха посредством циркуляции его через внешний радиатор (тип ПР). В серии принята шкала мощностей с коэффициентом нарастания, близким к 1,25, применена кремнийорганическая изоляция, позволившая снизить вес в среднем на 27%, проведена широкая унификация деталей, имеется защита от радиопомех и др.

Конструкции машин серии ПН и П даны на рис. 161 и 162.

*Серии КПД, КПДН и МП* предназначены для оборудования кранов, подъемных механизмов и механизмов металлургических предприятий. Двигатели выполняются в защищенном и закрытом исполнении. Серия КПД (на роликовых подшипниках) и КПДН (на шарикоподшипниках) охватывает 12 типов: КПДН-2-у; КПДН-2-ш; КПДН-3-у; КПДН-3-ш; КПДН-4-у; КПДН-4-ш; КПД-220/615; КПД-300/555; КПД-500/496; КПД-640/467; КПД-800/44 и КПД-1250/418. Двигатели КПД и КПДН предназначены для повторно-кратковременной работы и охватывают диапазон мощностей от 2,7 до 179 *квт*.

Двигатели от КПДН-4-у до КПД-1250/418 изготовляются с независимой вентиляцией. Двигатели конструируются на напряжение 220 и 440 *в* и выполняются с последовательным, смешанным и параллельным возбуждением.

Новая серия крановых двигателей МП выпущена взамен КПД и частично КПДН. Электродвигатели МП изготовляются на 220÷440 *в* в основном с последовательной обмоткой возбуждения. Диапазон



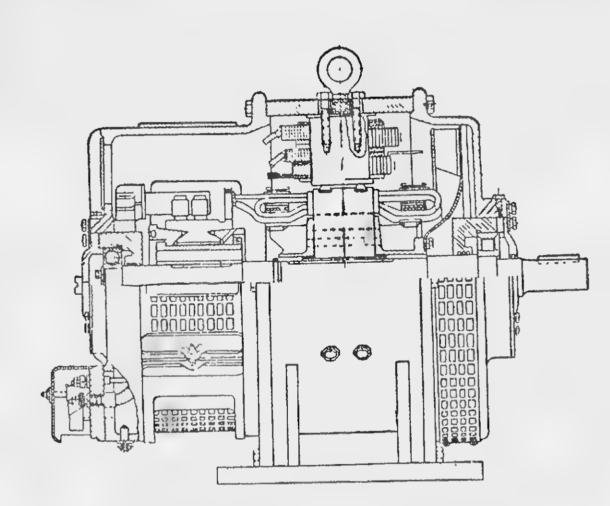


Рис. 161. Машина постоянного тока ПН-145.

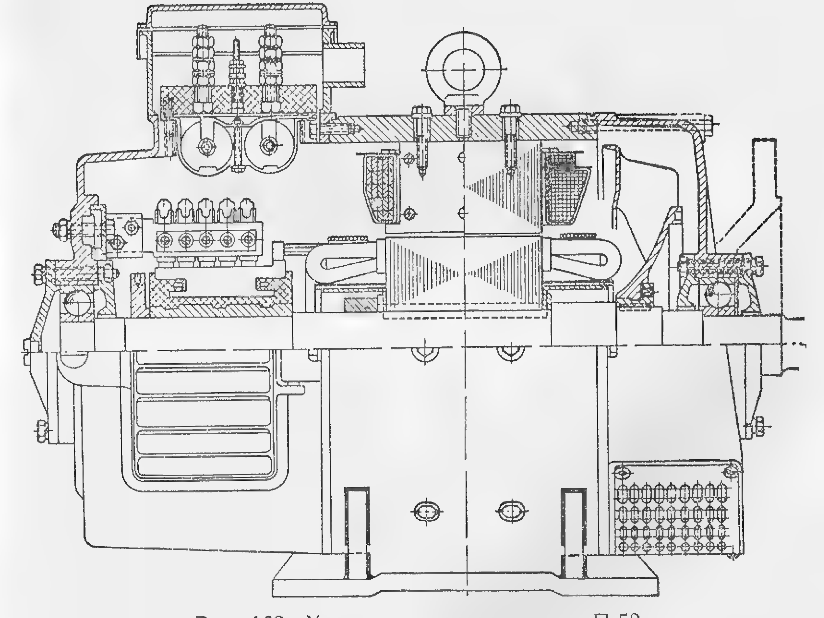


Рис. 162. Машина постоянного тока П-52.

мощностей 25÷105 *квт*. В основном машины закрытые с естественной самовентиляцией.

Серия построена на 8 диаметрах якоря при четырех главных полюсах, установленных на восьмигранной станине. Начиная с 5-го габарита, станина разъемная. Для всех двигателей принят в качестве нормального режима повторно-кратковременный режим с ПВ-25% (длительность цикла не должна превышать 10 мин.). Кроме этого, двигатели рассчитаны на часовой режим с ПВ = 15%, 40% и 60%. В целях повышения надежности двигателей в новой серии применена изоляция класса В, а номинальные скорости несколько снижены по сравнению с экономическими.

*Серия* МП-540. Серия МП-540 охватывает генераторы постоянного тока с диапазоном мощности от 0,8 до 66 *квт* с оборотами в пределах 375—750 об/мин, которые выполняются в защищенном исполнении на напряжения 115 и 230 *в* и предназначены для прямого соединения с двигателями внутреннего сгорания и другими первичными двигателями. Серия МП-540 состоит из четырех типов: МП-542, МП-543, МП-544, МП-545. Последняя цифра обозначения типа указывает на возрастание диаметра якоря.

*Серия ЗД.* Генераторы серии ЗД предназначены для зарядки аккумуляторных батарей и бывают трех типов на мощности 4; 7,5 и 12 *квт* при оборотах 1450 об/мин для напряжений 24÷36 *в* и 48÷72 *в*.

*Серия ЗДН.* Генераторы серии ЗДН имеют два коллектора: ЗДН-1000 АН (0,432/0,48 *квт*; 1800 об/мин; 36/120 *в*), ЗДН-3000 А (1,5/1,5 *квт*; 2200 об/мин; 60/60 *в*).

*Серия НД.* Генераторы серии НД представляют собой двухколлекторные генераторы, предназначенные для гальванопластики. Серия имеет четыре типа (табл. 44).

Таблица 44

**Характеристика генераторов серии НД**

| Тип | Мощность (в *квт*) | Напряжение (в *в*) | Ток при напряжении 6 *в* (в *а*) | Ток при напряжении 12 *в* (в *а*) | Скорость вращения (в об/мин) |
|---|---|---|---|---|---|
| НД-500/250 | 3 | 6/12 | 500 | 250 | 1455 |
| НД-1000/500 | 6 | 6/12 | 1000 | 500 | 970 |
| НД-1500/750 | 9 | 6/12 | 1500 | 750 | 970 |
| НД-5000/2500 | 30 | 6/12 | 5000 | 2500 | 725 |

*Серия ВТ.* Турбовозбудители серии ВТ конструируются на мощности 32—115 *квт* при скорости вращения 3000 об/мин, с напряжением 120—230 *в*. Серия имеет шесть типов: ВТ-115—230; ВТ-75—150; ВТ-60—120; ВТ-60—230; ВТ-40—150; ВТ-32—120.

Первое число обозначает мощность, второе — напряжение.

*Серия ДП.* Двигатели серии ДП строятся на мощности от 100 до 450 *квт* при скорости вращения от 225 до 1500 об/мин, с напряжением от 220 до 600 *в*. Двигатели предназначены для привода различных механизмов, требующих широкого предела регулирования скорости.



*Серия ГП.* Генераторы серии ГП строятся для соединения с асинхронными или синхронными двигателями переменного тока. Серия охватывает четыре типа (табл. 45).

Таблица 45

**Характеристика генераторов серии ГП**

| Тип | Мощность (в *квт*) | Напряжение (в *в*) | Скорость вращения (в об/мин) |
|---|---|---|---|
| ГП-55/34=4 | 320 | 460 | 985 |
| ГП-74/29=6 | 500 | 600 | 1000 |
| ГП-55/24=6 | 150 | 115 | 735 |
| ГП-74/29=6 | 320 | 120 | 735 |

Серия тяговых двигателей. Основные данные тяговых двигателей сведены в табл. 46.

Таблица 46

**Основные данные тяговых двигателей**

| Наименование | Типы двигателей | | |
|---|---|---|---|
| | ДПИ-150 | ДПЭ-340 | ДПЭ-400 |
| Номинальная мощность, *квт* | $P_{час} = 173$ | 340 | $P_{час}=340/400$ |
| Напряжение, *в* | 750/1500 | 1500/3000 | 3000 |
| Число полюсов | 4 | 4 | 4 |
| Число пазов якоря | 39 | 57 | 57 |
| Число проводников якоря | 390 | 684 | 684 |
| Тип обмотки | Волновая | Волновая | Волновая |
| Изоляция | Класс В | Класс В | Класс В |
| Наибольшая допустимая температура | 145° С | 145° С | 145° С |
| Вес (без шестерен), *кг* | 2450 | 4300 | 4300 |
| Сопротивление обмотки якоря, *ом* | 0,0545 | 0,182 | 0,0774 |
| Сопротивление обмотки возбуждения, *ом* | 0,0365 | 0,0858 | 0,0855 |
| Сопротивление обмотки дополнительных полюсов, *ом* | 0,0224 | 0,0446 | 0,0446 |
| Ток длительный (часовой), *а* | 185/250 | 220/250 | — |
| Скорость вращения, об/мин | 840 | 630 | 1550 |
| К. п. д. | — | 92% | 91,5% |
| Наибольший ток, допустимый по коммутации, *а* | 500 | — | 600 |
| Диаметр якоря/диаметр коллектора, *мм* | 440/380 | — | 635/565 |
| Длина якоря, *мм* | 350 | — | 355 |
| Зазор, *мм* | 5 | — | 6 |

Напряжения. Обычно машины постоянного тока строятся на низкие стандартные напряжения: генераторы — 115; 230; 460 *в*, двигатели — 110; 220; 440 *в*.

Получение высоких напряжений ограничивается коммутацией. Из опытов установлено, что среднее допустимое напряжение между коллекторными пластинами находится в пределах $e_к = 13 \div 30$ *в*. Отсюда видно, что машина, построенная на высокое напряжение, должна иметь коллектор с очень большим числом коллекторных пластин.

Предельным напряжением является напряжение порядка 1500—3000 *в*. Для получения более высоких напряжений обычно применяют последовательное соединение генераторов.

Сила тока. Вследствие ограниченности повышения напряжения с ростом мощности сила тока в машинах большой мощности может достигать весьма больших значений (до 10—20 тыс. *а*). Это приводит к необходимости выполнения якорей с большим числом параллельных ветвей, а также к проблеме надежной и экономичной работы коллектора, изготовленного на большие силы тока.

Скорость вращения и окружные скорости на якоре и коллекторе. Скорость вращения может быть задана при проектировании или может подлежать выбору.

Ниже показано, что для машин постоянного тока, как и для других электрических машин, существует соотношение

$$Pn \to K_1, \qquad (1)$$

где $K_1$ имеет экономические пределы, различные для разных типов машин.

Экономические пределы скорости зависят от назначения машины и требований электропривода и от экономичности самой конструкции (расход материалов, к. п. д., коммутация, нагрев).

Из (1) видно, что с ростом мощности скорость вращения должна уменьшаться (при предельных коэффициентах $K_1$).

У машин постоянного тока величина $K_1$ меняется в очень широких пределах, оставаясь постоянной величиной для машин предельно большой мощности.

При проектировании чаще всего скорость задается условиями работы машины (приводного механизма, первичного двигателя и т. п.). Например, скорость тяговых двигателей определяется скоростью движения, диаметром колеса и рациональным выбором передаточного отношения шестерен; скорость возбудителей, сидящих на одном валу с ротором синхронной машины, жестко задана ее скоростью и т. д.

Конструкции машин постоянного тока весьма разнообразны. По способу внешней защиты машины могут быть разделены на открытые, защищенные и закрытые; по способу вентиляции — на машины с естественной вентиляцией, с внутренней самовентиляцией, с наружной самовентиляцией и с принудительной (внешней) вентиляцией; по форме — на горизонтальные и вертикальные.



Характер нагрузки и влияние ее на выбор размеров машин. Машина может быть построена для следующих основных режимов:

а) длительного;

б) кратковременного;

в) повторно-кратковременного.

Во всех случаях размеры машин будут определяться эффективным значением потерь в машине, условиями теплоотдачи и условиями коммутации.

Характер нагрузки может также сказаться на конструктивном выполнении машин. Так, например, для часто реверсируемого привода необходим двигатель с малым маховым моментом. Это требование заставляет выполнять машину вытянутой по оси с уменьшенным диаметром якоря, отступая при этом от наиболее выгодных соотношений между длиной и диаметром. Для привода поршневых насосов, компрессоров и т. д., наоборот, требуются двигатели с большим маховым моментом. В этом случае машина может быть спроектирована с укороченной длиной якоря и с увеличенным его диаметром.

Система возбуждения. Машина может быть выполнена с параллельным (шунтовым), последовательным (сериесным) и смешанным (компаундным) возбуждением*. Система возбуждения выбирается в зависимости от характера нагрузки. Приводы, требующие постоянства скорости при переменной нагрузке, оборудуются двигателями с параллельным возбуждением. Двигатели с параллельным возбуждением имеют «жесткую» скоростную характеристику, т. е скорость вращения двигателя мало изменяется с изменением тока нагрузки, а развиваемый им момент пропорционален току якоря:

$$M = c_м \Phi I_a \equiv I_a.$$

Приводы, требующие «мягких» скоростных характеристик, больших пусковых моментов, оборудуются двигателями с последовательным возбуждением. Так как поток двигателя при отсутствии насыщения пропорционален току якоря $\Phi \equiv I_a$, то момент двигателя приблизительно пропорционален $I_a^2$, или ток пропорционален $\sqrt{M}$.

Скорость двигателя

$$n = \frac{U - I_a R}{c_E \Phi}$$

с ростом момента нагрузки резко уменьшается. Такая характеристика двигателя выгодна в условиях тяги, где в момент трогания необходимо развить значительно больший момент, чем во время движения. При этом момент двигателя возрастает значительно больше, чем его мощность, в противоположность двигателю с параллельным возбуждением, у которого момент пропорционален мощности.

Двигатели с последовательным возбуждением широко применяются в тяге и крановых механизмах.

---

* Термины в скобках: «шунтовые», «сериесные» и «компаундные» оставлены как *вторые* термины, часто встречающиеся в литературе.

Двигатели со смешанным возбуждением могут быть выполнены с преобладанием последовательной или параллельной обмотки, и в зависимости от этого их характеристики будут близки к тому или иному типу двигателей. В зависимости от преобладания той или иной обмотки двигатели могут иметь различное применение. Так, например, двигатели с преобладающей последовательной обмоткой широко используются для электротранспорта (трамвай, троллейбус). Двигатели с преобладающей параллельной обмоткой находят применение на приводах с ударной нагрузкой (прокатные станы и т. п.). Генераторы постоянного тока почти всегда имеют последовательную обмотку, служащую для стабилизации напряжения при переменной нагрузке.

Проблема коммутации и выбор типа обмотки. В отличие от машин переменного тока у машин постоянного тока на выбор размеров и их соотношений оказывает существенное влияние необходимость обеспечения надежной коммутации.

Электрический расчет коммутации встречает серьезные затруднения. Поэтому при расчете важно не превзойти основных критериев хорошей коммутации, т. е. допустимых: величины напряжения между соседними коллекторными пластинами $\varepsilon_к$, реактивной э. д. с. $e_р$ и плотности тока под щеткой $s_щ$ (см. ниже). Для хорошей длительной работы машины необходимо, чтобы коммутация была безыскровой. Искрение под щетками вызывается рядом разнообразных причин.

Из электрических причин главными являются повышенная плотность тока под щетками и неравномерное распределение плотности тока под щетками.

Причинами неравномерной плотности тока являются:

1. Неполная компенсация реактивной э. д. с., коммутируемой секции $e_р$, возникающей вследствие изменения тока в короткозамкнутой секции от $+i_a$ до $-i_a$ (появление дополнительных коммутационных токов).

2. Уравнительный ток, протекающий через щетку между параллельными ветвями обмотки якоря вследствие неравенства э. д. с. в ветвях (недостаточная эффективность уравнительных соединений и т. д.).

Кроме искрения под щетками, может возникнуть потенциальное искрение на коллекторе, которое совместно с искрением под щетками иногда приводит к появлению кругового огня.

Потенциальное искрение возникает вследствие искажения основного потока потоком якоря, в результате чего происходит перераспределение напряжения по коллектору, и максимальное напряжение между коллекторными пластинками становится больше допустимых пределов:

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{к\,max} &= 25 \div 28\ в\\ \varepsilon_{к.\,ср} &= 16 - 22\ в\end{aligned}\right\}\ \text{для машин с компенсационной обмоткой,}$$

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{к\,max} &= 17 \div 22\ в\\ \varepsilon_{к.\,ср} &= 12 - 16\ в\end{aligned}\right\}\ \text{для машин без компенсационной обмотки.}$$



К механическим причинам искрения можно отнести загрязнение коллектора, вибрацию щеток и т. п.

Для устранения причин искрения применяют следующие методы:

а) правильный подбор сорта щеток и их размеров;

б) сдвиг щеток в машинах без дополнительных полюсов;

в) компенсацию реактивной э. д. с. короткозамкнутой секции полем добавочных полюсов, создающим э. д. с. вращения в короткозамкнутой секции, направленную против реактивной э. д. с. Обычно э. д. с. вращения при нормальном режиме должна несколько превышать реактивную э. д. с. (ускоренная коммутация).

Для уменьшения уравнительных токов, протекающих через щетки, в соответствующих случаях применяют уравнительные соединения первого или второго рода [99].

В особо тяжелых условиях нагрузки в крупных машинах для уменьшения искажения поля и устранения причин кругового огня применяется компенсационная обмотка.

Значительное влияние на характер коммутации имеет выбор типа обмотки. Благоприятными в отношении коммутации являются: 1) обмотки с сокращением шага на величину, равную половине пазового деления; 2) ступенчатые обмотки с $\frac{K}{up}$ и $\frac{K}{p}$, равными нечетным числам, т. е. $u$, равным нечетному числу, или $\frac{Z}{p}$, равным нечетному числу; 3) в крупных и быстроходных машинах или в машинах с тяжелыми условиями коммутации рекомендуется применение лягушечьих обмоток или двухходовых петлевых обмоток с полным числом уравнительных соединений.

Во всех случаях желательно выбирать *минимальное* число витков в секции $w_s$. Необходимо проверить возможность применения обмотки с $w_s = 1$. Иногда приходится применять обмотку с $w_s = \frac{1}{2}$.

При $u = 2$ желательно сделать разные шаги катушек, лежащих рядом (шаг одной катушки должен быть настолько укорочен, насколько шаг другой удлинен [98]). Это, однако, приводит к удорожанию машины, поэтому такая конструкция рекомендуется лишь в случаях тяжелых условий коммутации машины (перегрузка и т. д.).

Особое значение имеет проблема коммутации при толчкообразных нагрузках машин. В этом случае необходимо принимать в расчет насыщение и рассеяние дополнительного полюса, а также влияние вихревых токов в полюсах и ярме и ряд других сложных явлений.

Конструкция якоря. Одной из основных частей машины является якорь, собранный из штампованной динамной стали толщиной 0,5 *мм*.

В большинстве случаев якорь собирается в виде отдельных пакетов толщиной 4—5 *см*, между которыми остается вентиляционный канал шириной 1 *см*.

Пакеты у малых машин собираются прямо на валу, у средних на литой якорной буксе, надеваемой на вал, а у крупных машин пакеты собираются на якорной звезде обычно сварной конструкции. На рис. 163 представлено железо якоря. На поверхности якоря имеет выштампованные пазы, в которые укладывается обмотка. В пазах обмотка укрепляется деревянными или текстолитовыми клиньями, а иногда проволочными бандажами. Лобовые части укрепляются проволочными бандажами.

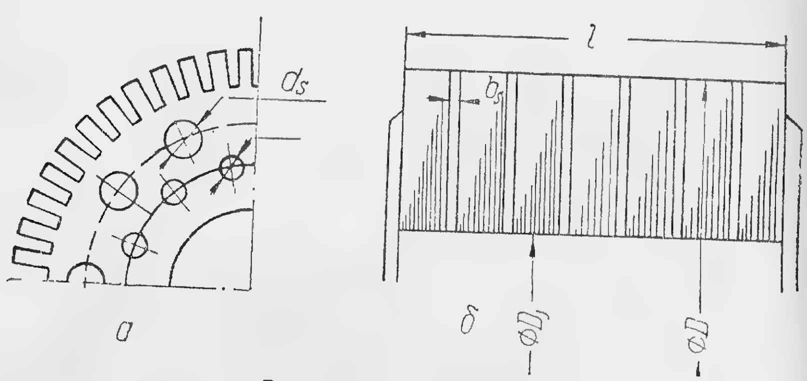



Рис. 163. Железо якоря:
*а* — с аксиальной вентиляцией и $D_j = d_{вала}$; *б* — с радиальной вентиляцией и $D_j \gg d_{вала}$.

Обмотки якорей выполняются различных типов: петлевые, волновые (простые и множественные), лягушечьи, обмотки с мертвой секцией, искусственно замкнутые.

Чаще всего применяются простая петлевая и простая или двухходовая волновая обмотки.

Обмотки изготовляются в виде отдельных секций, которые потом укладываются в пазы якоря.

Обычно применяется изоляция обмотки класса А. Изоляция класса В применяется в тяговых и специальных машинах, в машинах высокого напряжения.

Обмотка может быть выполнена из круглой или прямоугольной меди. Машины средней и большой мощности имеют обмотки исключительно из прямоугольной меди.

Прямоугольная медь дает лучшее заполнение паза и более удобна при изготовлении секций. Сечение одного проводника из условий удобства изготовления обмотки, а отчасти во избежание дополнительных потерь от вихревых токов, желательно выбирать не больше чем 3 × 20 *мм*. Стандартные сечения обмоточной меди приведены в приложении III.

Коллектор собирается из коллекторной твердотянутой меди специального профиля. К коллекторным пластинам припаиваются концы секций непосредственно или с помощью «петушков». Ширина коллекторной пластины берется в пределах 2—10 *мм*. Чаще всего применяют ширину пластины $\beta_к = 3 \div 5$ *мм*. Изоляция между пластинами выполняется из коллекторного миканита. Толщина изоляции 0,5; 1,0 *мм*.



Главные полюсы. Сердечники главных полюсов набираются из штампованных листов динамной стали, прессуются и скрепляются заклепками. Одновременно с сердечником штампуется как одно целое и полюсный наконечник. Полюсы крепятся к ярму (станине) стальными болтами.

Обмотка главных полюсов выполняется в виде отдельных катушек (часто на каркасе) из круглой или прямоугольной меди. Катушки соединяются последовательно (или группами) так, чтобы обеспечить правильное чередование полярности полюсов. Сечение меди определяется величиной тока возбуждения. Главный полюс может иметь одну обмотку параллельного или последовательного возбуждения или ту и другую у машин со смешанным возбуждением. Обмотки параллельного возбуждения имеют большое число витков малого сечения, так как ток возбуждения равен 3—5% от основного тока, а последовательные обмотки имеют небольшое число витков большого сечения, так как ток обмотки равен току якоря.

Сердечники добавочных полюсов изготовляются из литой или листовой (у машин с резко меняющейся нагрузкой) стали. При расчете добавочных полюсов необходимо иметь в виду, что их поток рассеяния превосходит основной поток в 3—5 раз, в то время как у главных полюсов он составляет 15—20% от основного потока.

Добавочные полюсы и компенсационная обмотка. Практически все машины постоянного тока, начиная от 1 *квт* и выше, в настоящее время снабжаются добавочными полюсами, основным назначением которых является компенсация реактивной э. д. с. короткозамкнутой секции (см. ниже).

Компенсационная обмотка служит для компенсации поля якоря и выполняется только у машин средней и большой мощности при тяжелых условиях работы (рис. 164).

Ярмо (или «станина»)* изготовляется из литой стали совместно с лапами для крепления машины или делается сварным из листовой стали.

Ярмо должно обладать достаточным сечением для магнитного потока и, кроме того, иметь достаточную жесткость.

Воздушный зазор в машинах постоянного тока в зависимости от мощности выбирается от долей миллиметра до 8—10 *мм*. Величина его определяется реакцией якоря машины и приблизительно пропорциональна полюсному делению.

Зазор под полюсом делается неравномерным для уменьшения потерь от пульсации, а также для улучшения коммутации (рис. 165).

В машинах постоянного тока обычно применяется аксиальная (рис. 166) или смешанная системы вентиляции.

---

* Под «ярмом» понимается часть магнитопровода, служащая для замыкания полезного потока. Под «станиной» или «корпусом» понимается часть машины, поддерживающая полюсы и ярмо и обеспечивающая крепление к фундаменту. Иногда эти понятия совпадают.

а

в

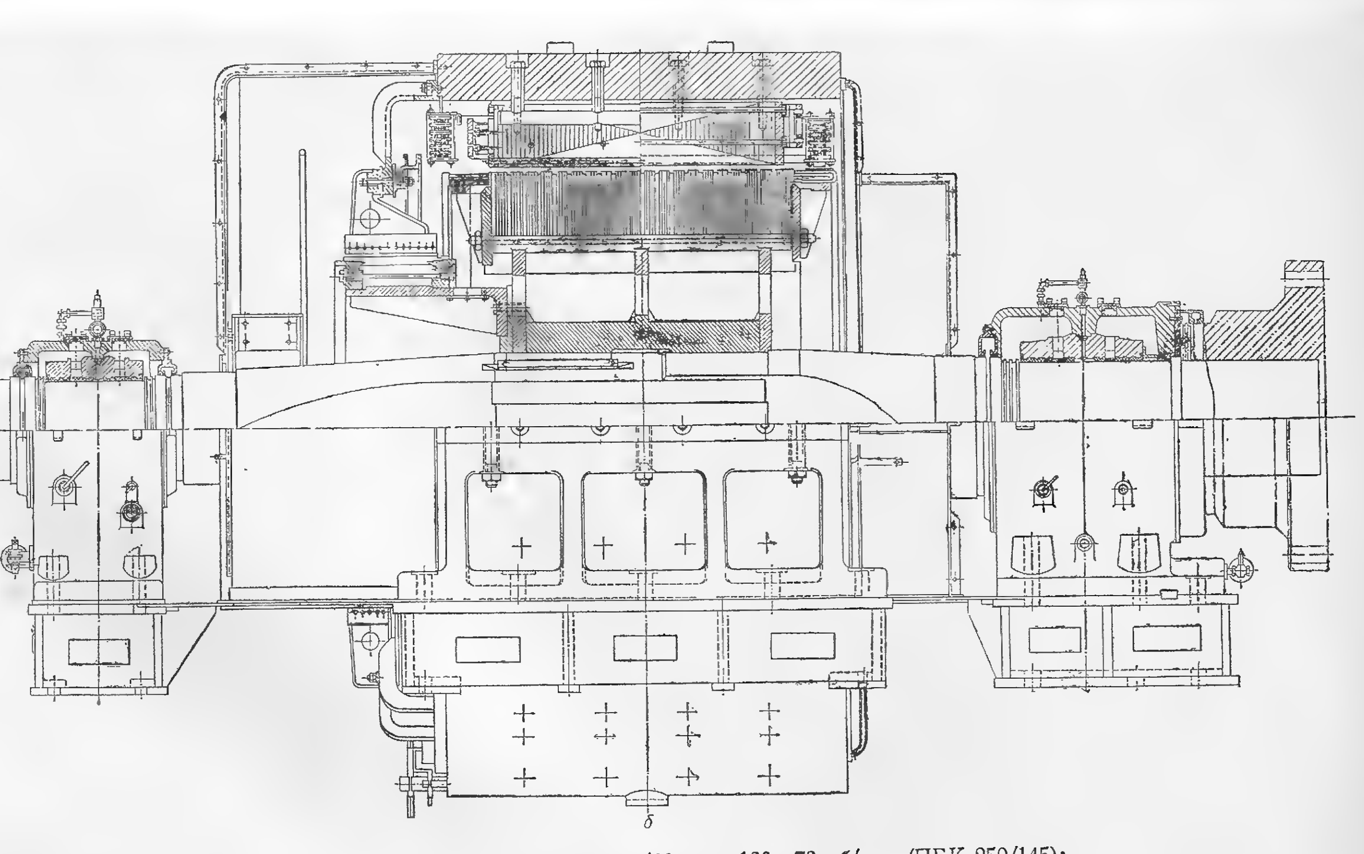



Рис. 164. Прокатный двигатель 4560 *квт*, 120—70 об/мин (ПБК 250/145):
*а* — общий вид; *б* — продольный разрез; *в* — поперечный разрез.

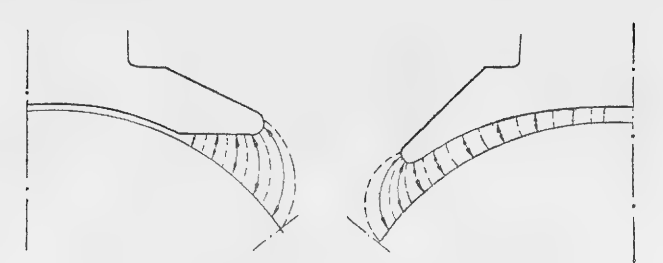


Рис. 165. Формы полюсного наконечника.

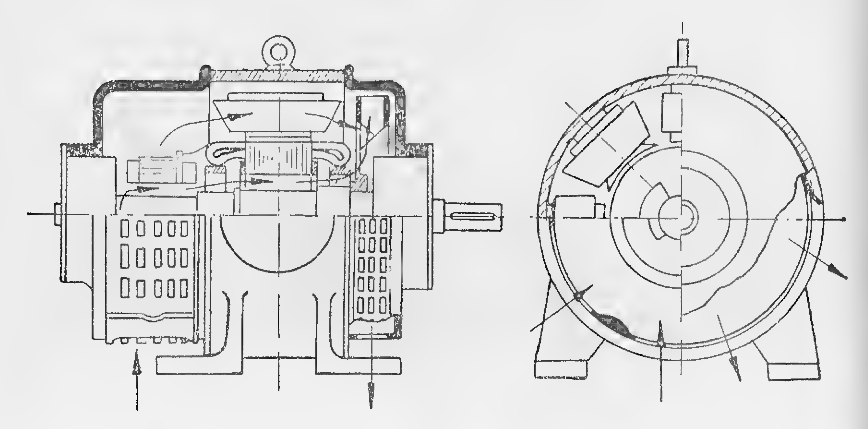


Рис. 166. Машина постоянного тока с аксиальной вентиляцией.

## 10-2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ. ВЫБОР РАЗМЕРОВ

### Основные соотношения

При проектировании машин постоянного тока задаются:

1) мощность, 2) скорость вращения, 3) конструктивный тип и система вентиляции, 4) условия окружающей среды, 5) режим работы (перегрузки), 6) пределы регулирования скорости (для двигателей).

Выбор основных размеров более сложен, чем в машинах переменного тока, т. к. здесь подлежит выбору частота перемагничивания и число полюсов. Кроме того, здесь налагается ряд дополнительных условий (критерии коммутации, окружные скорости якоря и коллектора, тип обмотки и пр.). Поэтому мы рассмотрим ниже методы определения размеров с указанием особенностей для машин мелких, средних и крупных.



Первая формула, связывающая геометрические размеры, скорость вращения и мощность машины. Внутренняя мощность машины постоянного тока

$$P_i = EI.$$

Электродвижущая сила якоря

$$E = pn\frac{N}{a}\Phi, \tag{2}$$

причем

$$E = U \pm IR \pm \Delta U_{щ}.$$

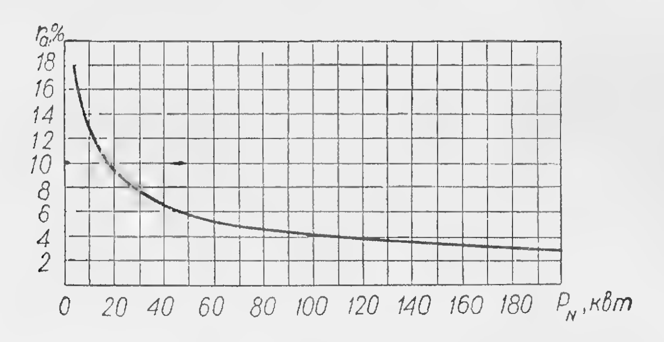



Рис. 167. Зависимость сопротивления якоря шунтовых машин типа ПН от номинальной мощности.

В величину $R$ в общем случае входит сумма сопротивлений обмотки якоря $r_a$ последовательной обмотки $r_{fп}$, обмотки добавочных полюсов $r_к$ и компенсационной обмотки $r_c$.

Согласно ГОСТ 183—41 падение напряжения под щетками одной полярности принимается равным 1 *в* для угольных и графитовых щеток и 0,3 *в* для металлоугольных щеток.

Сопротивление обмотки якоря может быть определено по формуле

$$r_a = \mathbf{r}_a\frac{U_N}{I_N}\, ом, \tag{2a}$$

где $\mathbf{r}_a = \frac{I_N r_a}{U_N}$ — относительное сопротивление, равное относительной величине падения напряжения в якоре при номинальном токе.

Величина $\mathbf{r}_a$ приведена на рис. 167 для различных мощностей электрических машин типа ПН.

При мощностях свыше 200 *квт* можно принять

$$\mathbf{r}_a \approx \mathbf{r}_{a200}\left(\frac{200}{P\ квт}\right)^{\frac{1}{4}}. \tag{2б}$$

Величина э. д. с. якоря может быть ориентировочно определена также по формуле

$$E_N \approx U_N \left(1 \pm \frac{1-\eta_N}{2}\right), \qquad (2в)$$

полученной в предположении, что потери в меди якоря составляют $^1/_2$ всех потерь в машине. Знак «плюс» относится к генераторному режиму, знак «минус» — к двигательному режиму.

Так как $r_a$ равно относительным потерям в меди, то

$$r_a \approx \frac{1-\eta}{2}.$$

Сопротивление $r_a$ в омах определится по (2а).

Значение к. п. д. при номинальной нагрузке может быть ориентировочно определено по рис. 168.

Рис. 168. К. п. д. машин постоянного тока в зависимости от номинальной мощности.

Выражая ток якоря через линейную нагрузку

$$I = \frac{\pi D A}{N} 2a, \qquad (3)$$

а поток машины как

$$\Phi = \frac{\pi D}{2p} \alpha_i B_\delta l_i \qquad (4)$$

и подставляя в формулу (1а) значения $E$, $I$, $\Phi$, получим первую основную формулу

$$\boxed{P_i = \pi^2 \alpha_i D^2 l_i n A B_\delta.} \qquad (5)$$

Из выражения (5), являющегося основным для выбора размеров, видно, что мощность машины пропорциональна:

1) произведению $AB_\delta$, характеризующему удельную электромагнитную нагрузку якоря;

2) скорости вращения $n$, об/сек;

3) произведению $D^2 l_i$, *см*³.

Отсюда можно сделать следующие выводы:

1. Мощность машины, снимаемая с единицы объема (веса) якоря, пропорциональна скорости вращения, т. е. машины с бо́льшей скоростью вращения имеют бо́льшую мощность на единицу веса материалов или при заданной мощности легче по весу.

2. При заданной скорости $n$ мощность с единицы объема пропорциональна произведению $AB_\delta$.

Необходимо, следовательно, стремиться по возможности к большей индукции $B_\delta$, линейной нагрузке $A$ и скорости вращения $n$, если желательно получить при заданной мощности минимальный расход материалов.



Однако, как мы увидим в дальнейшем, увеличение скорости вращения приводит к уменьшению веса лишь в определенных пределах, а для индукции $B_\delta$ и линейной нагрузки $A$ *существуют пределы*, превышение которых в нормальных машинах нежелательно.

Увеличение скорости вращения $n$ связано с возрастанием окружной скорости якоря

$$v_a = \pi D n, \qquad (6)$$

которая для машин постоянного тока из условий центробежных сил в якоре и коллекторе, а также из условий коммутации в нормальных конструкциях обычно не допускается больше 45—50 *м/сек*.

Кроме того, увеличение скорости вращения связано с возрастанием частоты перемагничивания в якоре

$$f = pn.$$

Повышение частоты выше 50 ÷ 60 *гц* приводит к повышению потерь на гистерезис и вихревые токи. Обычно в машинах постоянного тока выбирают частоту $f = 30 \div 40$ *гц*, а иногда и меньше. Понижение частоты приводит к понижению использования активных материалов. Как видно из формулы (2), уменьшение $pn$ приводит к увеличению расхода меди и стали, если плотности тока и индукции неизменны.

Увеличение линейной нагрузки связано с увеличением нагрева и реактивной э. д. с.

Произведение $sA\rho = w_{Cu}$ представляет собой тепловой поток с единицы поверхности якоря, а перепад температур $\theta$ равен (§ 6-2)

$$\theta_{Cu} = \frac{w_{Cu}}{\alpha}.$$

Следовательно, при заданной допустимой величине $\theta_{Cu}$ величина $w_{Cu} = sA\rho$ не может быть больше $\alpha\theta_{Cu}$ *вт/см*² (относительно предела плотности тока см. ниже).

Реактивная э. д. с. коммутируемой секции

$$e_р = 2 l_i w_s v_a A \zeta, \qquad (7)$$

где $\zeta$ — величина, пропорциональная проводимости рассеяния короткозамкнутой секции;

$w_s$ — число витков в секции.

Величина $e_р$, исходя из условий коммутации, должна быть по возможности наименьшей.

Увеличение индукции в воздушном зазоре $B_\delta$ приводит: а) к увеличению потерь в стали, так как индукции в зубцах и ярме якоря пропорциональны $B_\delta$, а потери в стали пропорциональны квадрату индукции; б) к возрастанию мощности возбуждения (см. зависимость м. д. с. от индукции — приложение II).

Поэтому для $A$ и $B_\delta$ практически существуют пределы. Обычные пределы индукций в зазоре и в других частях машины приведены в табл. 47.

*Таблица 47*

**Индукции в зазоре и в других частях магнитной цепи (в $вб/м^2$)**

| Участки | Мощности | | |
|---|---|---|---|
| | малые | средние | большие |
| Воздушный зазор | 0,5—0,6 | 0,7—0,9 | 0,8—1,1 |
| Ярмо якоря | 1,1—1,3 | 1,3—1,4 | 1,3—1,5 |
| Зубцы якоря | 1,2—1,4 | 1,5—1,8 | 1,5—2,2 |
| Полюсный сердечник | 1,2—1,4 | 1,3—1,5 | 1,4—1,6 |
| Зубцы полюса (при наличии обмотки на полюсах) | — | 1,5—1,8 | 1,5—2,2 |
| Ярмо статора (стальное литье) | 1,1—1,3 | 1,3—1,4 | 1,4—1,5 |

Таким образом, выбор величины нагрузок $A$ и $B_\delta$, определяющих затрату активных материалов машины, лимитирован:

а) условиями нагрева машины и экономическими условиями;

б) условиями получения определенных рабочих свойств машины (падение напряжения, коммутация и т. д.);

в) величиной намагничивающего тока.

Влияние задаваемого к. п. д. При постоянных удельных нагрузках к. п. д. машины возрастает с ростом мощности $P$ по закону

$$\eta = 1 - k_э \left(\frac{2p}{P}\right)^{\frac{1}{4}},$$

где $k_э$ — коэффициент пропорциональности (§ 2-3), равный приблизительно единице, если $P$ выражено в ваттах.

Уменьшение постоянной $k_э$ с целью повышения к. п. д. связано с уменьшением загрузок активных материалов $s$ и $B$ и с ростом затраты материалов. Поэтому существует экономическое значение нагрузок и экономическое значение к. п. д. для машины данных мощности и числа полюсов. Практические значения к. п. д. машин постоянного тока приведены на рис. 168.

Кроме абсолютного значения к. п. д. при номинальных условиях, имеет значение характер кривой изменения к. п. д. в функции нагрузки. Максимум к. п. д., как известно, будет при равенстве постоянных потерь, не зависящих от тока нагрузки, и переменных потерь, зависящих от квадрата тока нагрузки:

$$\eta_x = \frac{x}{x + k_1 + k_2 x + k_3 x^2}, \qquad (7а)$$

где $x = \frac{I}{I_N} = \frac{P}{P_N}$ (при $U = \text{const}$);

$k_1$ — относительные постоянные потери $\left(\frac{\Sigma p_{пост}}{P}\right)$ при $P = P_N$;

$k_2$ — относительные потери, зависящие от тока, при $P = P_N$;

$k_3$ — относительные потери, зависящие от квадрата тока, при $P = P_N$.



Уравнение $\frac{\partial \eta_x}{\partial x} = 0$ дает $\eta_{max}$ при $k_1 = k_3 x^2$ или при $x = \sqrt{\frac{k_1}{k_3}}$

$$\eta_{max} = \frac{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}}{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}(1 + k_2) + 2k_1}.$$

Кривые $\eta_x$ представлены на рис. 169. Как видно из рис. 169, машина, часто работающая при недогрузках, должна иметь кривую $\eta_x$ типа пунктирной линии, а машина, рассчитанная на перегрузки, — кривую типа сплошной линии.

Вторая основная формула (учет условий коммутации). Величина скорости вращения и мощность связаны также

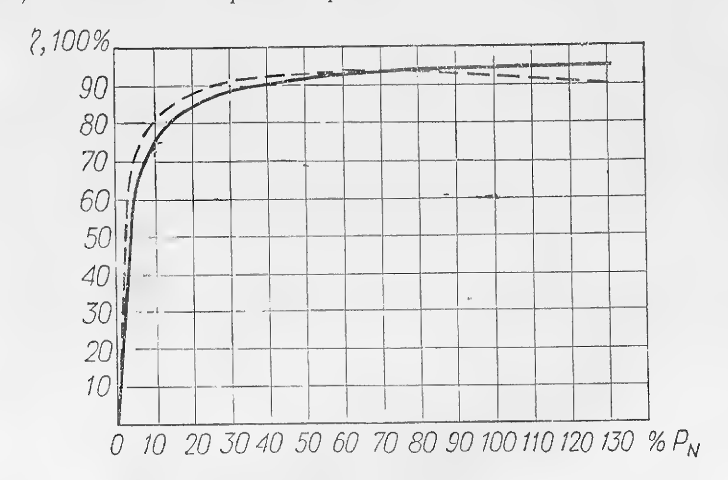



Рис. 169. Зависимость к. п. д. от нагрузки для машин мощностью 2000 *квт* при различных соотношениях потерь.

с величинами линейной нагрузки $A$, окружной скорости $v_a$ и среднего напряжения между соседними коллекторными пластинами $\varepsilon_к$ формулой

$$\varepsilon_к = \frac{E}{K} 2p,$$

где $K$ — число коллекторных пластин.

Предельные значения $\varepsilon_к$ даны в § 10-1. Так как

$$P_i = EI = \frac{\varepsilon_к K}{2p} \frac{\pi D A}{N} 2a,$$

$$v_a = \pi D n, \quad N = 2w_s K,$$

то

$$P_i = 0{,}5\pi\varepsilon_к D A \frac{a}{w_s p} \qquad (8)$$

или

$$P_i n = 0{,}5\varepsilon_к v_a A \frac{a}{p w_s} = K_1. \qquad (8а)$$

Формула (8) является весьма важной при выборе размеров. Большинство крупных машин выполняется с петлевой обмоткой и одним витком в секции, для которой $w_s = 1$ и $a = p$, тогда

$$P_i n = 0{,}5\varepsilon_к v_a A = K_1. \quad (8б)$$

У машин предельно большой мощности величины $\varepsilon_к$, $A$ и $v_a$ достигают предельных значений и величина $K_1 \to \text{const}$.

Отсюда видно, во-первых, что при постоянном $K_1$ и увеличении мощности машины ее скорость должна уменьшаться и, во-вторых, что для любой мощности существует предельная скорость вращения, или для любой скорости существует предельная мощность. Так, например, при предельных величинах $v_a = 50$ *м/сек*, $A = 500$ *а/см*, $\varepsilon_к = 20$ *в* получим

$$(P_i n)_{\max} = 0{,}5 \cdot 20 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 500 = 2{,}5 \cdot 10^7 \text{ вт} \cdot \text{об/сек}.$$

При скорости вращения $n = 1000$ об/мин (16,7 об/сек) получим предельную мощность $P_{i\max} = (2{,}5 \cdot 10^7) : 16{,}7 = 1\,500\,000$ *вт* (1500 *квт*).

Формула (8) позволяет при заданной мощности и при свободном выборе скорости вращения выбрать наилучшую скорость вращения, исходя из желаемых величин, входящих в $K_1$.

При заданных скорости вращения и мощности величина $K_1$ вполне определена и, следовательно, приходится выбирать соответствующие величины, входящие в $K_1$, согласно формуле (8).

Пусть, например,

$$P_i = 1000 \text{ квт}, \; v_a = 45 \text{ м/сек}, \; A = 400 \text{ а/см}, \; \varepsilon_к = 16 \text{ в}.$$

Тогда

$$n = \frac{0{,}5 \cdot 16 \cdot 4500 \cdot 400 \cdot 60}{1000 \cdot 10^3} = 860 \text{ об/мин},$$

т. е. для $P_i = 1000$ *квт* при заданных $v_a$, $A$, $\varepsilon_к$ и при $a = p$, $w_s = 1$ предельная скорость равна 860 об/мин.

Третья основная формула (условия окружной скорости). Из формулы (5) можно получить выражение для мощности через полюсное деление $\tau$ или окружную скорость

$$P_i = 4p^2\alpha_i\tau^2 l_i A B_\delta n = 4pf\alpha_i\tau^2 l_i A B_\delta \quad (9)$$

или, подставляя в (9) $\tau = \frac{v_a}{2pn}$,

$$P_i n = \alpha_i v_a^2 l_i A B_\delta \; \frac{вт}{сек}. \quad (9а)$$

Из формул (8) и (9) можно показать, что предельные значения длины и диаметра машины постоянного тока определяются допустимой величиной $\varepsilon_к$, линейной нагрузкой $A$ и индукцией $B_\delta$:

$$l_{i\max} = \frac{\varepsilon_к a}{2\alpha_i v_a B_\delta p w_s}; \quad D_{\min} = \frac{P_i \cdot p w_s}{0{,}5\pi A \varepsilon_к a}. \quad (9б)$$



В гл. 1 и 2 показано, что экономические размеры машины зависят от правильного выбора удельных нагрузок $A$ и $B$ и от правильного выбора геометрических соотношений:

а) отношения полюсного деления $\tau$ к длине машины $l$ $\left(\beta = \frac{\tau}{l}\right)$;

б) отношения глубины паза $h_п$ к полюсному делению $\tau$ $\left(\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}\right)$;

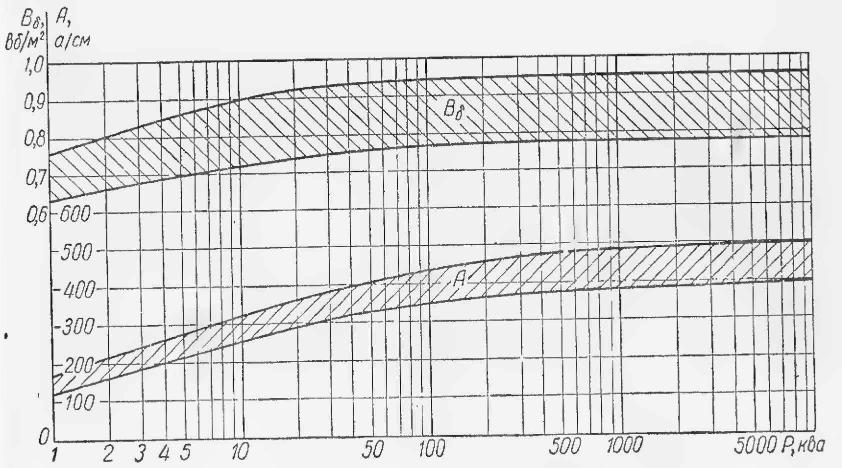



Рис. 170. Индукции в воздушном зазоре и линейные нагрузки для машин постоянного тока.

в) отношения средней ширины паза $b_п$ к шагу паза $t_1$ $\left(\lambda = \frac{b_п}{t_1}\right)$;

г) отношения средней ширины зубца $b_z$ к шагу паза $t_1$ $\left(\zeta = \frac{b_z}{t_1}\right)$.

Удельные нагрузки $A$ и $B$ на основании данных опыта построенных машин приведены на рис. 170. Если ввести коэффициент заполнения паза $\varphi_{Cu} = \frac{Q_{Cu}}{Q_п}$, равный отношению полного сечения меди к сечению паза, и коэффициент заполнения длины машины $\varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i}$, равный отношению длины чистого железа $l_{Fe}$ к полной расчетной длине, то, как показано в § 1-6, линейная нагрузка может быть представлена через плотность тока $s$

$$A = s\lambda\varphi_{Cu}h_п \; \frac{a}{см},$$

а индукция в зазоре через среднюю индукцию в зубцах

$$B_\delta = B\zeta\varphi_{Fe} \; \frac{вб}{см^2}.$$

Подставляя эти значения $A$ и $B$ в (9), получаем

$$P_i = 4pf\alpha_i\frac{\tau^4}{\beta}k_\varphi\lambda_1 sB \text{ вт}, \quad (10)$$

где $k_\varphi = \lambda \varphi_{Cu} \zeta \varphi_{Fe}$ — представляет некоторый «эффективный коэффициент заполнения» и имеет оптимальную величину при $\lambda = \zeta = 0{,}5$.

Коэффициент $\varphi_{Cu}$ зависит от типа обмотки. Для круглой меди (в мелких машинах) $\varphi_{Cu} \approx 0{,}3$, для прямоугольной меди $\varphi_{Cu} \approx \approx 0{,}4 \div 0{,}6$ в зависимости от числа проводников в пазу. Коэффициент $\varphi_{Fe}$ для машин без радиальных каналов равен коэффициенту проклейки листов $k_п \approx 0{,}92 \div 0{,}93$. При наличии радиальных каналов $\varphi_{Fe} \approx 0{,}8 \div 0{,}85$ в зависимости от ширины канала и пакета. В среднем можно принять $k_\varphi \approx 0{,}06 \div 0{,}07$. Коэффициенты $\lambda_1$ и $\beta$ также имеют оптимальную величину, определенную в § 2-8: $\lambda_1 = 0{,}07 \div 0{,}1$, $\beta = 0{,}4 \div 0{,}6$ в крупных и $\lambda_1 = 0{,}15 \div 0{,}3$, $\beta = = 1 \div 2$ в мелких машинах.

Таким образом, выбрав плотность тока, как показано в § 10-3 или в табл. 50, индукцию $B_\delta$ по рис. 170 и определив $B$ из уравнения $B = \frac{B_\delta}{\zeta \varphi_{Fe}}$, мы можем определить из (10) полюсное деление

$$\tau = \left(\frac{P_i \cdot \beta}{4pf\alpha_i k_\varphi \lambda_1 sB}\right)^{\frac{1}{4}} = C_s \cdot \left(\frac{P_i \beta}{2pf\sqrt{2}\lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}}, \tag{11}$$

где величина

$$C_s = (\sqrt{2}\alpha_i k_\varphi \cdot sB)^{-\frac{1}{4}} \ \frac{см}{дж^{\frac{1}{4}}} \tag{12}$$

называется **универсальной машинной постоянной** и изменяется в весьма узких пределах для всех машин $\left(C_s = 4 \div 4{,}5 \ \frac{см}{дж^{\frac{1}{4}}}\right)$.

Формулы (11) и (12) дают возможность определить размеры машин с учетом оптимальных величин основных конструктивных коэффициентов и удельных нагрузок $s$ и $B$.

### Выбор основных размеров

Задаваясь величиной $C_s$ в указанных выше пределах или определяя ее по (12) при выбранных коэффициентах и удельных нагрузках $s$ и $B$, получаем

$$\tau\sqrt{p} = C_s'' \sqrt[4]{\frac{P}{n}}, \tag{13}$$

где

$$C_s'' = C_s \sqrt[4]{\frac{\beta}{2\sqrt{2}\lambda_1}} \approx 4{,}5 \div 5$$

(в мелких машинах $C_s'' \approx 5{,}5 \div 6$); $P$ — *вт*, $n$ — об/сек.

Как видно, для определения $\tau$ необходимо сначала выбрать число полюсов машины. Приемлемые числа полюсов можно получить, задаваясь частотой в якоре в пределах $f = 10 - 50$ *гц*. (Более высокая частота приводит к возрастанию потерь.) При этом

$$p = \frac{f}{n\,(об/сек)}.$$



Для быстроходных машин ($n = 500 - 3000$ об/мин) выгодно выбрать $f = 50 - 70$ *гц*, для тихоходных ($n = 50 - 100$ об/мин) — $f = 10 - 15$ *гц*. Понижение частоты для тихоходных машин выгодно, т. к. при высокой частоте получились бы весьма большие числа полюсов и чрезмерно большие диаметры. Кроме этого, тихоходные машины обычно большой мощности и имеют большие сечения меди. Высокая частота привела бы к недопустимым потерям в меди и стали якоря.

Минимальное число полюсов для крупных машин может быть определено по соотношению

$$2p_{\min} = \frac{2P_i}{UI_p} = \frac{2I_N}{I_p} \ (\text{целое четное число}),$$

где $I_p$ — ток на 1 щеточный болт ($I_{p\,max} = 1000 - 1200$ *а*).

Чрезмерно малое число полюсов приводит к утяжелению станины и к ухудшению условий коммутации и охлаждения машины (возрастает длина якоря и коллектора), а чрезмерно большое — к уменьшению жесткости станины, к увеличению междуламельного напряжения и к возрастанию диаметра и махового момента, что особенно нежелательно для реверсивных двигателей.

Как показано в § 10-4, в ряде случаев выбор числа полюсов определится желаемым типом обмотки. В табл. 48 в зависимости от величины

$$\tau\sqrt{p} = C_s'' \cdot \sqrt[4]{\frac{P}{n}}$$

даны ориентировочные значения $p$, $\tau$ и $\beta$; при этом $P$ — *вт*, $n$ — об/сек.

Выбрав значения $\beta$, $2p$ и $\lambda_1$ по (11) получим ориентировочные значения $\tau$, а также

$$D = \frac{2p\tau}{\pi}; \quad l = \frac{\tau}{\beta}; \quad h_п = \tau\lambda_1.$$

Полученные значения $D$ и $l$ проверяем по табл. 49 и сравниваем с данными выполненных машин (табл. 57). Целесообразно задаться рядом вариантов с различными значениями $\beta$, $2p$ и по мере дальнейших расчетов выбирать наилучшие из них.

**Метод машинной постоянной Арнольда.** Путем выбора удельных нагрузок $A$ и $B_\delta$ по формуле (5) определяем $D^2 l_i$:

$$D^2 l_i = \frac{P_i}{\pi^2 \alpha_i n A B_\delta}. \tag{14}$$

При этом величины $A$ и $B_\delta$ можно выбрать по рис. 170. Верхний предел на кривых рис. 170 соответствует более использованным машинам. Можно также пользоваться машинной постоянной

$$C_A = \frac{D^2 l_i n}{P_i} = \frac{1}{\pi^2 \alpha_i A B_\delta} \tag{14а}$$

или обратной ей величиной — коэффициентом использования $K_A = = \frac{1}{C_A}$. При этом

$$D^2 l_i = \frac{P_i}{n} \cdot C_A. \tag{14б}$$

*Таблица 48*

**Рекомендуемые пределы для 2 $p$, $\tau$ и $\beta$**

| $2p$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ (в об/сек) | 50—100 | 15—50 | 15—25 | 10—15 | 5—10 | (1—4) 4—8 | (1—4) 4—7 | (1—3) 3—6 | (1—2) 2—5 | (2—5) 1—2 | (2—5) 1—2 | (2—5) 1—2 | (2—5) 1—2 |
| $\tau$ (в *см*) | 15—70 | 15—70 | 25—70 | 35—70 | 45—70 | 45—70 | 45—70 | 50—70 | 50—70 | 50—70 | 50—65 | 50—60 | 50—55 |
| $\tau\sqrt{p}$ | 15—70 | 21—98 | 43—120 | 70—140 | 100—157 | 110—170 | 120—185 | 140—200 | 150—210 | 160—220 | 166—216 | 173—210 | 180—200 |
| $\beta$ | 2—1,0 | 2—0,7 | 1,5—0,6 | 1,5—0,6 | 1,5—0,5 | 1,3—0,5 | 0,8—0,5 | 0,8—0,5 | 0,7—0,5 | 0,7—0,5 | 0,7—0,5 | 0,7—0,4 | 0,6—0,3 |

Примечание. Числа в скобках употребляются реже.

Машинные постоянные в зависимости от мощности представлены на рис. 171 по данным построенных машин. Выбирая, как показано выше, отношение

$$\beta = \frac{\tau}{l_i} = \frac{\pi D}{2p} \cdot \frac{1}{l_i} \tag{15}$$

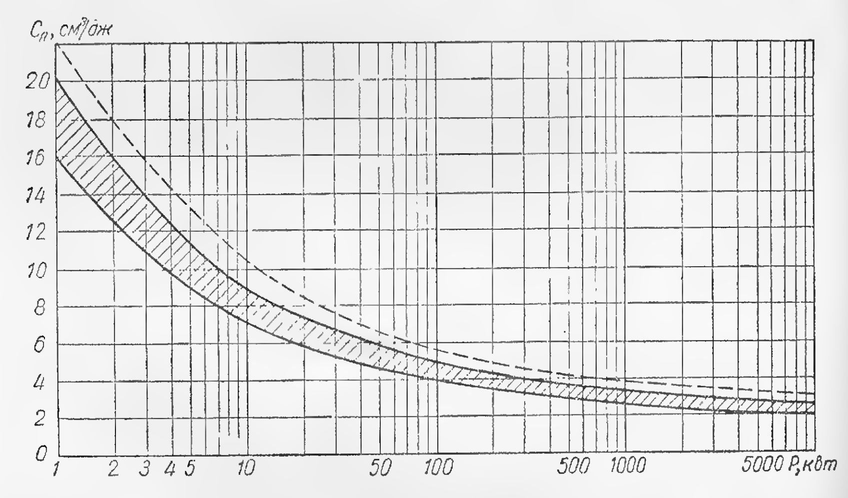



Рис. 171. Постоянная Арнольда для машин постоянного тока (пунктиром дан верхний предел для менее использованных машин).

и подставляя в (14б), получаем

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_i}{n} \cdot \frac{2p \cdot \beta}{\pi} \cdot C_A} \tag{16}$$

или

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \sqrt[3]{\frac{P_i}{n}\left(\frac{\pi}{2p}\right)^2 \cdot C_A \cdot \beta}\,. \tag{17}$$

Число полюсов и отношение $\beta$ выбирается в соответствии с табл. 48.

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{\pi D}{2p\beta}. \tag{18}$$



Далее, как и в первом методе, проверяем на допустимость окружной скорости $v_a = \pi D n < 65$, *м/сек* полюсного деления $\tau < 70$ *см*, учитывая нормаль МЭП (табл. 49) или серийные диаметры (приложение I). При пересчете диаметра длина изменяется так, чтобы произведение $D^2 l$ оставалось постоянным. Окончательные размеры длины устанавливаются после выбора и расчета обмотки.

*Таблица 49*

**Внешние диаметры статоров переменного тока и якорей постоянного тока (нормаль МЭП 643-17)**

| Диаметр (в *мм*) | Припуск на штамповку (в *мм*) | Из какого листа штампуется | Диаметр (в *мм*) | Припуск на штамповку (в *мм*) | Из какого листа штампуется |
|---|---|---|---|---|---|
| 102 | 5 | 750 × 1500 | 368 | 7 | 750 × 1500 |
| 120 | 5 | 750 × 1500 | 423 | 7 | 800 × 1720 |
| 145 | 5 | 750 × 1500 | 493 | 7 | 1000 × 2000 |
| 167 | 5 | 860 × 1720 | 560 | 10 | 860 × 1720 |
| 182 | 5 | 750 × 1500 | 650 | 10 | 1000 × 2000 |
| 210 | 5 | 850 × 1720 | 740 | 10 | 750 × 1500 |
| 245 | 5 | 750 × 1500 | 850 | 10 | 860 × 1720 |
| 280 | 7 | 860 × 1720 | 990 | 10 | 1000 × 2000 |
| 327 | 6 | 1000 × 2000 | | | |

Примечание. Диаметр 560 раскраивается в комбинации с 280, диаметр 650 — с 327.

Если диаметр якоря получается значительно больше 99 *см*, то якорь набирается из отдельных сегментов (рис. 172) с учетом рационального раскроя листа.

Метод определения диаметра и длины для крупных машин. Для крупных машин число витков в секции $w_s = 1$ и $a/p = m$ (при $m = 1$ — простая петлевая обмотка, при $m = 2$ — двухходовая петлевая обмотка).

Из формулы (8)

$$D = \frac{P w_s p}{0{,}5\pi\varepsilon_к A a}.$$

По [59], как показано ниже в примере расчета, для крупных машин целесообразно исходить из допустимой реактивной э. д. с. короткозамкнутой секции

$$e_p = 2l_i v_a w_s A\zeta = 2l_i \pi D n w_s A\zeta. \qquad (19)$$

Величина $\zeta$ для крупных машин с многоходовой или лягушечьей обмоткой равна $(3 \div 4)\cdot 10^{-8}$.

Из общего уравнения (5) имеем

$$D^2 l_i n = C_A P_i. \qquad (19a)$$

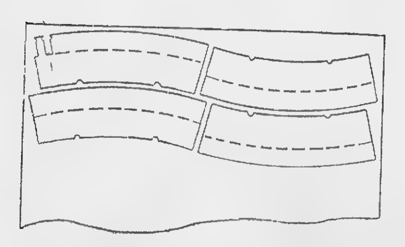


Рис. 172. Раскрой якорных сегментов для машин с диаметром якоря (свыше 99 *см*).

Из (19) и (19а) находим

$$D = \frac{2\pi w_s A\zeta}{e_p} C_A P_i. \qquad (20)$$

Максимально допустимое значение $e_p$ по условиям коммутации для машин с двойной кратковременной перегрузкой можно принять 6—7 *в*; $C_A$ (в *см*$^3$ · *об/квт · мин*) можно брать по рис. 173, на котором построены зависимости

$$D = f_1\left(\frac{P}{n}\right) \text{ и } C_A = f_2\left(\frac{P}{n}\right)$$

В формуле (20) $C_A$ в (*см*$^3$/*дж*), $P_i$ в *вт*, на основе подробного анализа выполненных союзными заводами и иностранными фирмами высокоиспользуемых двигателей.

Подставив значение $C_A$ по (14 а), получим

$$D = \frac{2}{\pi}\cdot\frac{w_s P_i \zeta}{\alpha_i B_\delta e_p}. \qquad (21)$$

Определив значение $D$ и $C_A$ по рис. 173 и проверив $D$ по допустимой окружной скорости (65 *м/сек*), находим длину

$$l_i = \frac{P C_A}{D^2 n}. \qquad (22)$$

Эта длина должна быть не больше, чем по (9б).

Рис. 173. Кривые значений $D = f\left(\frac{P}{n}\right)$ и $C_A f\left(\frac{P}{n}\right)$ для высокоиспользованных машин (предел $C_A$ из условий коммутации).

На рис. 174 представлены кривые, позволяющие определить допустимую скорость двигателя $n_{1\,max}$ при выбранных размерах $D$ и $l$. Диаметры на рис. 174 соответствуют диаметрам крупных машин постоянного тока, изготовляемых в настоящее время на союзных заводах.



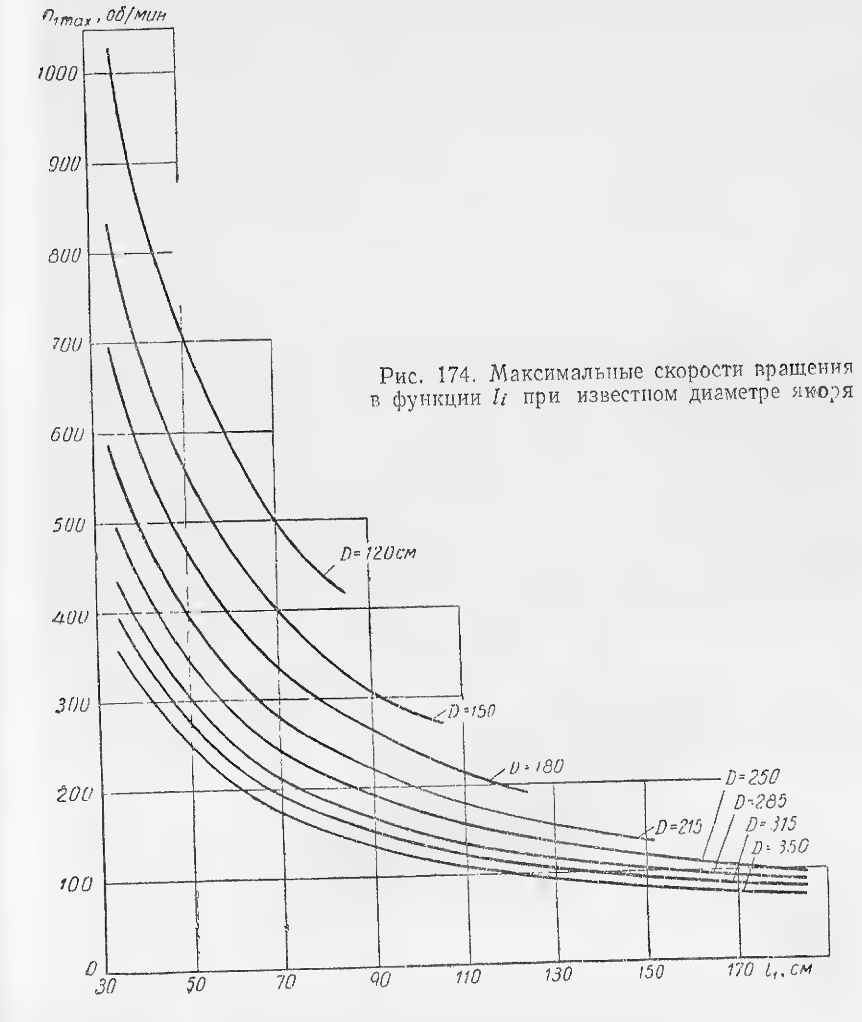



Рис. 174. Максимальные скорости вращения в функции $l_i$ при известном диаметре якоря

## 10-3. ВЫБОР ПЛОТНОСТИ ТОКА В ЯКОРЕ

Выбор плотности тока определяется экономическими и тепловыми условиями.

Как показано в гл. 2, из экономических соображений существует оптимальное соотношение между потерями в железе и в меди

$$\xi = \frac{P_{Cu}}{P_{Fe}} = \frac{s^2 G_{Cu} k_{Cu}}{B^2 G_{Fe} k_{Fe}},$$

при этом

$$s = B\sqrt{\xi \frac{G_{Fe} k_{Fe}}{G_{Cu} k_{Cu}}}. \qquad (23)$$

Индукция $B$ имеет предел по насыщению и нагреву, а отношение весов железа и меди также имеет оптимальную величину. Следовательно, имеет определенную величину и плотность тока. Удельные потери в меди $s^2 k_{Cu}$ *вт/кг*, где $k_{Cu} = \frac{\rho}{\gamma} = 2{,}4 \cdot 10^{-4}$ при $s$ в $a/см^2$, должны быть приблизительно во столько раз больше удельных потерь в железе $B^2 k_{Fe}$, во сколько стоимость единицы веса обмотки выше, чем стоимость единицы веса железа. Другой вывод заключается в том, что удельные потери в меди равны

$$s^2 k_{Cu} = \frac{m'_{Cu}}{k},$$

где $m'_{Cu}$ — стоимость одного *кг* обмотки с учетом изоляции;

$k$ — стоимость потерь за период окупаемости ($k \approx 1$ *руб/вт*).

При этом

$$s = \sqrt{\frac{m'_{Cu}}{k k_{Cu}}}. \quad (24)$$

Например, при $m'_{Cu} = 20$ *руб/кг* $s = \sqrt{\frac{20}{1 \cdot 2{,}4}} \approx 3$ *а/мм²*.

Из соображений нагрева необходимо, чтобы произведение

$$sA\rho = w_{Cu}, \quad (25)$$

представляющее удельный тепловой поток с поверхности якоря от потерь в меди, не превосходило определенных значений

$$w_{Cu} = \theta_{Cu} \cdot \alpha, \quad (26)$$

где $\theta_{Cu}$ — перепад температуры поверхности якоря, вызываемый потерями в меди якоря;

$\alpha$ — коэффициент теплоотдачи поверхности.

Например, при значениях $\theta_{Cu} = 40°\,C$ и $\alpha = 60$ *вт/м² °С* (0,006 *вт/см² °С*) получаем

$$sA\rho = 40 \cdot 0{,}006 = 0{,}24 \text{ вт/см}^2.$$

При $A = 300$ *а/см* и $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$ *омсм*

$$s = \frac{0{,}24}{300 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 400 \text{ а/см}^2 \ (4 \text{ а/мм}^2).$$

Плотность тока по нагреву определяется мощностью машины, типом изоляции обмотки и условиями вентиляции. Для мелких машин защищенной конструкции с самовентиляцией и изоляцией класса $B$ обычно не выше

$$s = 2 + (2{,}5 \div 3)\, v_a^{0{,}25} \text{ а/мм}^2;$$

$$s = 2 + (1 \div 1{,}5)\, v_a^{0{,}25} \text{ а/мм}^2 \text{ (для средних и крупных).}$$



Для крупных машин с принудительной вентиляцией необходимо подставить $v_a \approx 40$—$50$ *м/сек*.

Произведение линейной нагрузки на плотность тока в зависимости от диаметра якоря приведено в табл. 50, где $s$ — *а/мм²*.

*Таблица 50*

**Произведение линейной нагрузки на плотность тока**

| $D$ (в *см*) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | до 250 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $As$ | 520 | 1200 | 1600 | 2000 | 2300 | 2400 | 2500 | 2550 | 2600 | 2900 |

## 10-4. ВЫБОР ОБМОТКИ ЯКОРЯ, ЧИСЛА ПАЗОВ И ИХ РАЗМЕРОВ

Обмотки машин постоянного тока бывают петлевые и волновые (простые и множественные). Кроме того, могут быть специальные обмотки: лягушечьи, с уменьшенным числом коллекторных пластин, с двумя коллекторами [37, 107, 62, 63].

Условия симметрии петлевых обмоток:

$$\frac{Z}{p} \text{ — целое число, } \frac{K}{p} \text{ — целое число, } \frac{2p}{a} \text{ — целое число.}$$

В большинстве случаев выполняются простые петлевые обмотки ($a = p$)

$$y_к = y_1 - y_2 = \overset{+}{(-)} 1 \text{ (обычно } y_1 > y_2).$$

Первый шаг по коллектору (равный шагу по секциям)

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon = \text{ц. ч.}$$

Шаг по пазам

$$y_п = \frac{Z}{2p} \pm \frac{\varepsilon}{u} = \frac{y_1}{u} = \text{ц. ч.},$$

где $\varepsilon$ — укорочение или удлинение шага; $K = uZ$.

Если число секционных сторон, лежащих рядом в одном пазу, $u = 1$, то $\frac{Z}{p}$ и $\frac{K}{p}$ может быть как четным, так и нечетным.

При $u > 1$ отношение $\frac{Z}{p}$ и $\frac{K}{p}$ из условия коммутации рекомендуется выбирать нечетным. Обычно $u = 2, 3, 4, 5$.

Если $\frac{y_1}{u}$ целое число, то получается обмотка с равными секциями; при $\frac{y_1}{u} \neq$ целому числу получается ступенчатая обмотка. Последняя предпочитается по условиям коммутации, но более сложна

в изготовлении. Шаг по пазам при этом равен ближайшему меньшему и ближайшему большему числу от $\frac{y_1}{u}$.

При множественной обмотке

$$y_к = \overset{+}{(-)} m = y_1 - y_2;$$

$$a = mp; \quad m = 2,\ 3\ \ldots$$

Если $K$ и $m$ взаимно простые числа, то обмотка получится однократнозамкнутая.

Если $K$ и $m$ имеют общий делитель $t$, то обмотка $t$-кратнозамкнутая, т. е. распадается на $t$ независимых обмоток. В частном случае, если $K$ делится на $m$, получается $m$-кратнозамкнутая обмотка. Обычно «показатель множественности» $m$ редко берут больше двух ($m = 2$), т. е. $a = 2p$ или $2a = 4p$. При этом, если $K$ нечетно, $p$ и $u$ должны быть нечетны. При $K$, четном $p$, может быть любое число, а $u$ должны быть четными; $Z/2p =$ ц. ч., $y_1$ и $y_2$ — нечетные числа.

Если пластины общих ходов обмоток $a = 2p$ расположить на двух сторонах якоря, то получится обмотка с двумя коллекторами. При этом для получения одинаковых э. д. с. одна обмотка должна иметь $y = 2$, а другая $y = -2$ (т. е. быть перекрещенной).

Условия симметрии волновых обмоток:

$$\frac{K}{a} \text{ — целое число}, \quad \frac{Z}{a} \text{ — целое число}, \quad \frac{p}{a} \text{ — целое число},$$

$a$ — число пар параллельных ветвей ($a = 1$ — простая волновая обмотка).

Для волновой обмотки

$$y_к = \frac{K \overset{-}{(+)} a}{p},$$

$$K = py_к \overset{+}{(-)} a = uZ = S \text{ (случаи } K \neq S \text{ см. ниже)};$$

$$y_к = y_1 + y_2,$$

откуда

$$\frac{Z}{a} = \frac{\frac{py_к}{a} \overset{+}{(-)} 1}{u} \text{ — целое число.}$$

Значения $u$, удовлетворяющие условиям симметрии, приведены в табл. 51.

Для $a = p$ берется петлевая обмотка.

Однократнозамкнутая обмотка получается, если $y_к$ и $a$ — взаимно простые числа.

Если $y_к$ и $a$ имеют общий наибольший делитель $t$, то обмотка будет $t$-кратнозамкнутая.



*Таблица 51*

**Однократнозамкнутые волновые обмотки**

| $a$ \ $p$ | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $a = 1$ | 3; 5 | 2; 4; 5 | 3; 5 | 2; 3; 4 | 5 | 2; 3; 4;5 | 3; 5 | 2; 4; 5 | 3 |
| $a = 2$ | — | (5) | 3; 5 | (3) | 2; 4; 5 | (3,5) | 3; 4 | (5) | 3; 4 |
| $a = 3$ | — | — | — | — | 3; 5 | — | — | 4,5 | — |
| $a = 4$ | — | — | — | — | — | — | 3; 5 | — | — |

Примечание. Значения $u$ в скобках означают, что соответствующие обмотки отступают от условий симметрии, однако они находят применение.

Двукратнозамкнутые обмотки могут быть выполнены при $a = 2$, $u = 2$ и $u = 4$, как указано ниже.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p$ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $u$ | 2; 4 | 2 | 2; 4 | 2 | 2; 4 | 2 | 2; 4 | 2 |

Если обмотка выполняется в виде ступенчатой, то

$$\frac{y_1 + c}{u} \text{ — целое число},$$

где $c$ следует выбрать по возможности близким к $\frac{u}{2}$.

Волновые обмотки с мертвыми секциями и искусственно замкнутые могут быть выполнены в том случае, когда число секций $S = uZ$ не равно числу коллекторных пластин. При этом берут такое число коллекторных пластин $K < S$, чтобы выполнялось условие

$$y_к = \frac{K \overset{-}{(+)} a}{p} \text{ — ц. ч.}$$

Оставшиеся секции закладываются в пазы, но не присоединяются к коллекторным пластинам (мертвые секции).

Другой способ выполнения волновой обмотки при $S \neq K$ состоит в искусственном замыкании мертвых секций путем разреза обмотки в соответствующих местах и присоединении мертвых секций искусственным проводником [53], [99].

Уравнительные соединения в петлевых обмотках (первого рода) соединяют точки обмотки, которые должны иметь равный потенциал. Эти точки находятся на расстоянии шага уравнительных соединений

$$y_у = \frac{K}{p}.$$

Уравнительные соединения (или уравнители) присоединяются к коллекторным пластинам, отстоящим друг от друга на $y_у$ пластин.

Соединения могут быть и на стороне, противоположной коллектору. Полное число групп уравнителей равно $\frac{K}{p}$. Обычно достаточно поставить неполное число 1/3 или 1/4 от $\frac{K}{p}$. Сечение уравнителей выбирают равным сечению якорных проводников или несколько меньше.

В простых волновых обмотках уравнители не требуются. Во множественных волновых обмотках приходится применять уравнительные соединения (второго рода). Назначение их — получить равномерное распределение токов параллельных ветвей и потенциала по коллектору. Шаг соединения равен $y_у = \frac{K}{a}$. Число уравнителей также неполное. Конструктивное исполнение уравнителей см. [53], [99].

Лягушечья обмотка представляет комбинацию петлевой и волновой обмоток. Свойства, применение и проектирование этого типа обмоток подробно изложены в работе В. Т. Касьянова [63]. Схемы обмотки приведены на рис. 184 и 195. Наиболее общие условия выполнимости $m$-ходовых петлевых якорных обмоток, лежащих в основе лягушечьих, также впервые указаны В. Т. Касьяновым в упомянутой работе и сводятся к следующим требованиям:

1) $\frac{Z}{p}$ — целое число, взаимно простое с $m$;

2) $\frac{K}{p} = y_у$ — целое число, взаимно простое с $m$.

Последнее требование выполнимо только в том случае, если $u$ и $m$ — взаимно простые числа. При $m = 1$ исходная петлевая обмотка будет простая и соответствующая лягушечья обмотка называется также простой. При $m > 1$ обмотки называются множественными. Второе требование при взаимно простых $u$ и $m$ обеспечивает жесткую потенциальную связь всех $m$ обмоток в случае $m$-ходовой $m$-кратнозамкнутой петлевой обмотки и всех $m$-ходов в случае $m$-ходовой однократнозамкнутой петлевой обмотки (что эквивалентно полному числу уравнителей). Кратность замыкания обмотки равна общему наибольшему делителю $t$ чисел $p$ и $m$.

После выбора исходной петлевой обмотки ($2a = 2\ mp$), $y_к = m$ выбор шагов волновой обмотки, присоединяемой к тем же пластинам и имеющей то же число параллельных ветвей ($2a = 2mp$) $y_к = \frac{K \pm mp}{p}$ — целое число, происходит автоматически, как показано на рис. 195.

Для обеспечения правильной коммутации в сложной лягушечьей обмотке ширина щетки должна удовлетворять двум требованиям:

$b_щ > m + 1$ коллекторных пластин;
$b_щ \geqslant t + 1$ » » .

В простых лягушечьих обмотках волновая обмотка получается иногда многократнозамкнутой. Поэтому необходимо проверить



кратность замыканий $t$ волновой обмотки и, если она велика, изменить соотношение чисел $Z$, $K$ и $p$ таким образом, чтобы получилась допустимая ширина щетки. Желательно, чтобы волновая обмотка была однократнозамкнутой.

Реактивная э. д. с. коммутации подсчитывается по формуле

$$e_р = 2Al_i v_a w_s \mu_0 \Sigma\lambda.$$

Но при этом проводимость рассеяния $\Sigma\lambda$ получается меньше, так как проводимость рассеяния лобовой части $\lambda_л$ уменьшается примерно на 25% и проводимость паза в случае схемы Латура-Перре (рис. 195) уменьшается на 100%.

Выполнение секций лягушечьих обмоток показано в примерах расчетов. Общее число параллельных ветвей в обеих обмотках равно

$$2a = 4mp.$$

Выбор типа обмотки является одной из самых важных задач. Рассмотрим один пример. Пусть надо выбрать обмотку для машины мощностью $P = 1000$ *квт*, напряжением $U = 525$ *в*, с числом пар полюсов $p = 4$.

Ток якоря такой машины

$$I_a = \frac{P}{U} = \frac{1000 \cdot 10^3}{525} = 1900\ a.$$

Если принять простую волновую обмотку $a = 1$, то ток в параллельной ветви будет равен

$$i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{1900}{2} = 950\ a.$$

Приняв допустимую плотность тока, равной, например, 4 *а/мм²*, получим сечение обмоточной меди

$$q_a = \frac{i_a}{s} = \frac{950}{4} = 237\ мм^2.$$

Из такой меди выполнить обмотку будет очень трудно.

Если принять простую петлевую обмотку $a = p$, то ток в параллельной ветви будет равен

$$i_a = \frac{I_a}{2p} = \frac{1900}{2 \cdot 4} = \frac{1900}{2 \cdot 4} = 238\ a,$$

и при той же плотности тока мы получим сечение обмоточной меди

$$q_a = \frac{i_a}{s} = \frac{238}{4} = 59{,}7\ мм^2,$$

что позволит применить прямоугольную обмоточную медь, удобную для изготовления обмотки.

*В крупных машинах* выбор типа обмотки может быть произведен с помощью формулы (8а), т. е.

$$P_i = 0{,}5\pi DA\varepsilon_к \frac{a}{pw_s}.$$

Из этой формулы видно, что диаметр машины данной мощности получится тем меньше, чем больше соотношение $\frac{a}{p}$ и чем меньше число витков секции $w_s$ (при заданных предельных значениях $A$ и $\varepsilon_к$). Поэтому в высокоиспользованных больших машинах всегда применяются одновитковые (а иногда и полувитковые) секции и исключаются полностью обмотки с $a = 1$ или $a < p$, вместо которых, как правило, применяются петлевые обмотки с $a = p$ (а иногда с $a > p$).

*В машинах средней мощности* применение петлевых обмоток может привести к очень малым сечениям провода, что, в свою очередь, приводит к плохому заполнению паза.

Исходя из этих условий, стараются сделать машину с минимальным числом параллельных ветвей. Ограничением уменьшения числа параллельных ветвей иногда является максимально допустимый ток на одну параллельную ветвь, который обычно находится в пределах 250—300 *а*, редко выше.

Кроме того, на тип обмотки влияет величина напряжения. Среднее напряжение между коллекторными пластинами $\varepsilon_к = 2p\frac{U}{K}$ не может быть выше приведенных в § 10-1 пределов, а число коллекторных пластин зависит от диаметра коллектора и допускаемой ширины коллекторной пластины.

В результате этих в известной степени взаимно противоречивых требований на практике установлены следующие области применения отдельных типов обмоток:

1. Простые волновые обмотки, не требующие уравнительных соединений, применяются для машин, мощность которых не превышает 50 *квт* при 110 *в*; 100 *квт* при 220 *в*; 320 *квт* при 440 *в*.

2. Простые петлевые обмотки применяются в малых двухполюсных машинах и в многополюсных машинах при мощности выше 500 *квт*.

3. Сложные волновые обмотки применяются для машин мощностью 150—300 *квт* при 220 *в*. При простой петлевой обмотке в таких машинах получается слишком большое число коллекторных пластин.

4. Комбинированные или лягушечьи обмотки применяют в машинах быстроходных, большой мощности и в машинах средней мощности при тяжелых условиях коммутации.

5. Сложные (множественные) петлевые обмотки применяются для крупных машин низкого напряжения, а также в тех случаях, когда желательно получить минимальный диаметр машин.

В *общем случае* при выборе обмоток поступают следующим образом.

Зная диаметр якоря, определяют диаметр коллектора

$$D_к = (0{,}6 - 0{,}85)\,D.$$

Для мелких машин принимают

$$D_к \leqslant D - 2h_п;$$



в крупных машинах принимают

$$D_к \leqslant D - 40 \text{ см}.$$

Нормальные диаметры коллекторов в *мм*: 350, 400, 450, 500, 550, 635, 800, 1000, 1150, 1300, 1700, 1900, 2100, 2500, 2800, 3150.

Приняв нормальный диаметр, проверяют его по окружной скорости

$$v_к = \pi D_к n \leqslant 30 - 35 \text{ м/сек}.$$

(В особых случаях $v_к$ достигает 70 *м/сек*).

Далее определяют максимально допустимое число коллекторных пластин

$$K_{max} = \frac{\pi D_к}{t_{к\,min}}, \tag{27}$$

где $t_{к\,min}$ — минимально допустимое коллекторное деление, причем

$$t_{к\,min} = \beta_{к\,min} + \beta_i,$$

где $\beta_к$ — толщина коллекторной пластины;

$\beta_i$ — толщина изоляционной прослойки.

Величина $\beta_к$ может быть выбрана по стандарту коллекторной меди:

$$\beta_к = 0{,}35;\ 0{,}4;\ 0{,}45;\ 0{,}55;\ 0{,}6;\ 0{,}8;$$
$$\beta_i = 0{,}05;\ 0{,}10 \text{ см}.$$

По максимально допустимому значению среднего напряжения между коллекторными пластинами $\varepsilon_к$ определяют минимально возможное число коллекторных пластин

$$K_{min} = \frac{2pU_N}{\varepsilon_{к\,max}}. \tag{28}$$

Далее по ранее выбранной индукции $B_\delta$ определяем поток

$$\Phi = B_\delta \alpha \tau l_i \tag{29}$$

и по формуле (2а) получаем

$$N = 2w_s K = \frac{Ea}{pn\Phi} \text{ или } K = \frac{Ea}{2pn\Phi w_s}. \tag{30}$$

Полученная формула дает возможность сопоставить ряд вариантов с различными $a$, $w_s$ и $p$, так как желаемые величины $K$ из уравнений (27) и (28) известны. Можно, например, задаться простой петлевой обмоткой $a = p$ и получить допустимое число $w_s$, которое должно быть проверено по уравнению (8), т. е.

$$P_i = 0{,}5\pi DA\varepsilon_к \frac{a}{pw_s};$$

можно задаться $w_{s\,min}$, исходя из условий коммутации (см. уравнение (7) для реактивной э. д. с. в короткозамкнутой секции), и получить величину $\frac{a}{p}$, а отсюда и тип обмотки. Окончательный выбор в ряде случаев может быть сделан только сравнением различных вариантов по основным показателям, как например:

а) по коммутации,
б) по стоимости производства,
в) по надежности в эксплуатации.

Наиболее просто выбор обмотки можно осуществить по (30), если определить сначала желаемую величину $K$ по (27) и (28) и желаемую величину $t_к = \frac{\pi D_к}{K}$.

Из (30) получаем

$$\frac{a}{w_s} = \frac{P}{EAt'_к} = \frac{I}{At'_к}, \tag{31}$$

где $t'_к = t_к \cdot \frac{D}{D_к}$.

Пусть, например, $P = 1000$ *квт*, $E = 500$ *в*, $A = 500$ *а/см*, $t'_к = 0{,}5$ *см*; при этом $\frac{a}{w_s} = \frac{1000 \cdot 10^3}{500 \cdot 500 \cdot 0{,}5} = 8$.

При $w_{s\,min} = 1$ получаем $a = 8$, т. е. выгодно выбрать простую петлевую обмотку с $a = p = 8$.

Другой пример: $P = 10$ *квт*, $A = 300$ *а/см*, $E = 220$ *в*, $t'_к = 0{,}4$ *см*. Получаем

$$\frac{a}{w_s} = \frac{10 \cdot 10^3}{220 \cdot 300 \cdot 0{,}4} \approx 0{,}4.$$

Очевидно, надо принять $a = 1$ (волновую обмотку) и $w_s = 2$. Наименьшее число $w_s$ из допустимой величины $\varepsilon_к$;

$$w_s \leqslant \frac{\varepsilon_к a}{4np^2\Phi}. \tag{32}$$

Правильность выбора типа обмотки следует проверить по току в параллельной ветви и по получаемому сечению меди. Иногда выгодно перейти к волновой обмотке с $a = p$ или $a > p$, если простая петлевая обмотка дает чрезмерно малое сечение провода, в результате чего провод приходится брать круглым. При волновой обмотке в этих случаях бывает возможно выполнить обмотку из проводов прямоугольного сечения.

Выбор числа и формы сечения пазов якоря производится следующим образом. После того как тип обмотки выбран, выбираем окончательное число коллекторных пластин $K$, число проводников $N$ и число пазов $Z$.

Число пазов выбирают, исходя из многих соображений. Прежде всего желательно учесть по возможности условия симметрии: $Z = \frac{K}{u}$ — целое число; $\frac{Z}{a}$ — целое число для волновых и $\frac{Z}{p}$ — целое число для петлевых обмоток и другие условия.

Число элементарных пазов в одном реальном может быть $u=1$, 2, 3, 4, 5 (редко больше).

Выбор числа $u$ определяется допустимой величиной пазового деления $t_1$, объемом тока на один паз и выполнимостью обмотки.



Задаваясь отношением ширины паза $b_п$ к зубцовому шагу $t_1$ $\left(\lambda = \frac{b_п}{t_1}\right)$ и плотностью тока $s$, получим объем тока в пазу

$$sb_п h_п \varphi_{Cu} = At_1, \tag{33}$$

где

$\varphi_{Cu}$ — коэффициент заполнения паза медью

$\varphi_{Cu} = \frac{S_{Cu}}{S_п} = \frac{\text{суммарное сечение всех проводников в пазу}}{\text{сечение паза}}$;

обычно $\varphi_{Cu} = 0{,}3 - 0{,}4$.

Из выражения объема тока в пазу можно получить ориентировочную высоту паза

$$h_п = \frac{A}{s\lambda\varphi_{Cu}}. \tag{34}$$

Высота паза в большинства машин равна $(0{,}1 - 0{,}15)\,\tau$.

Отношение высоты паза к ширине

$$\lambda_2 = \frac{h_п}{b_п}$$

из условий нагревания меди паза и коэффициента индуктивности находится в пределах 3,5—5,5. Меньшее значение $\lambda_2$ относится к малым машинам, а большее значение — к крупным машинам. Различные формы пазов представлены на рис. 175.

Задаваясь значениями $\lambda_2$, можно получить ориентировочное значение $t_1$:

$$t_1 = \frac{b_п}{\lambda} = \frac{h_п}{\lambda\lambda_2} = \frac{A}{s\lambda^2\lambda_2\varphi_{Cu}} \tag{35}$$

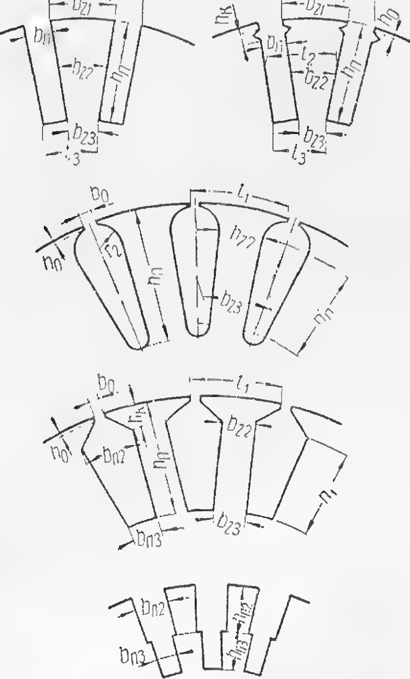


Рис. 175. Формы пазов якорей машин постоянного тока.

и по выбранному ранее диаметру якоря определить порядок величины $Z$:

$$Z = \frac{\pi D}{t_1} = \frac{\pi D s\lambda^2\lambda_2\varphi_{Cu}}{A}. \tag{36}$$

Округляем $Z$ до ближайшего целого числа, удовлетворяющего условиям симметрии и соотношению

$$Zu = K. \tag{37}$$

Наилучший выбор числа пазов якоря $Z$ может быть осуществлен лишь расчетом нескольких вариантов с различными числами зубцов и сравнением их основных показателей.

## 10-5. УТОЧНЕНИЕ ДЛИНЫ ЯКОРЯ, РАЗМЕРОВ ПАЗОВ И ЗУБЦОВ

Условная максимальная индукция

$$B'_{z\,\max} = B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{z\,\min} l_{\mathrm{Fe}}}, \tag{38}$$

где $l_i$ — расчетная длина якоря.

При радиальной вентиляции (крупные машины) задаемся средней шириной пакета $l' = 5 - 6$ *см* и находим число каналов, округляя его до ближайшего целого числа.

$$n_s = \frac{l_i}{l'}.$$

Затем определяем конструктивную длину (§ 3-2)

$$l = (n_s + 1)\, l' + n_s b_s; \quad l_i = l - 0{,}5 n_s b_s. \tag{39}$$

Длина чистого железа якоря

$$l_{\mathrm{Fe}} = (l - n_s b_s)\, k_{\text{п}}, \tag{40}$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент заполнения листового пакета; при лаковой изоляции листов стали толщиной 0,5 *мм* $k_{\text{п}} = 0{,}92$.

Минимальная ширина зубца по (38)

$$b_{z\,\min} = b_{z3} = \frac{B_\delta t_1 l_i}{B'_{z\,\max} l_{\mathrm{Fe}}} = \frac{\pi (D - 2h_{\text{п}})}{Z} - b_{\text{п}},$$

откуда

$$b_{\text{п}} = \frac{\pi (D - 2h_{\text{п}})}{Z} - \frac{B_\delta}{B'_{z\,\max}} \cdot \frac{t_1 l_1}{l_{\mathrm{Fe}}}. \tag{41}$$

Задаваясь предельной величиной $B'_{z\,\max}$, получаем $b_{\text{п}}$ и проверяем отношение $\lambda = \frac{b_{\text{п}}}{t_1}$.

Для случая аксиальной вентиляции и в мелких машинах $n_s = 0$.

Глубина паза и высота элементарного проводника $h$ в зависимости от частоты даны в табл. 52.

*Таблица 52*

**Глубина паза и высота элементарного проводника**

| $f$ | 75 | 50 | 40 | 30 | 20 | 15 и ниже |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $h_{\text{п}}$ (в *см*) | 3,5 | 4,3 | 4,8 | 5,2 | 5,6 | 6 |
| $h$ (в *см*) | 0,51 | 0,74 | 0,86 | 0,93 | 1,08 | 1,16 |

Окончательно $b_{\text{п}}$ и $h_{\text{п}}$ определяются после выбора меди и изоляции провода. Так как число элементарных пазов в одном реальном пазу $u$ выбрано, то при прямоугольной меди ориентировочный размер провода по ширине паза

$$b_{\mathrm{Cu}} = \frac{b_{\text{п}} - \Delta_b}{u w_s},$$

где $\Delta_b$ — общая толщина изоляции по ширине паза (приложение IV).



Сечение проводника при выбранной по §10-3 плотности тока

$$q_{\mathrm{Cu}} = \frac{I_a}{2a \cdot s}, \tag{42}$$

откуда размер проводника по высоте паза

$$h_{\mathrm{Cu}} = \frac{q_{\mathrm{Cu}}}{b_{\mathrm{Cu}}}.$$

После этого выбираем по стандарту размеры обмоточной меди (приложение III).

По выбранным значениям $q_{\mathrm{Cu}}$, $h_{\mathrm{Cu}}$, $b_{\mathrm{Cu}}$ пересчитываем:

а) плотность тока

$$s = \frac{I_a}{2a q_{\mathrm{Cu}}},$$

б) ширину паза

$$b_{\text{п}} = b_{\mathrm{Cu}} u w_s + \Delta_b,$$

в) глубину паза

$$h_{\text{п}} = 2h_{\mathrm{Cu}} + \Delta_h,$$

где $\Delta_h$ — суммарная толщина изоляции по высоте паза, которая может быть выбрана по приложению IV. Там же показаны размещения проводников в пазу при различных напряжениях и нормальная изоляция.

После окончательного выбора размеров паза и проверки максимальной индукции в основании зубца определяем шаги обмотки $y_1$ и $y_{\text{п}}$. Затем определяем среднюю длину полувитка, сопротивление обмотки якоря, потери в меди якоря.

Уточняем величины потока $\Phi$ и линейной нагрузки $A$:

$$\Phi = \frac{E \cdot a}{pnN}; \quad A = \frac{s_{\text{п}} I}{2at_1}, \tag{43}$$

где $s_{\text{п}}$ — число проводников в пазу:

$$s_{\text{п}} = \frac{N}{Z}.$$

Высота спинки якоря

$$h_a = \frac{\Phi}{2 l_{\mathrm{Fe}} B_{j1}}, \tag{44}$$

где $B_{j_1}$ — по табл. 47.

Внутренний диаметр якоря

$$D_{ai} = D - 2h_{\text{п}} - 2h_a.$$

## 10-6. ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА И РАЗМЕРОВ ПОЛЮСОВ

Величина воздушного зазора $\delta$ определяется степенью допустимого искажения поля от реакции якоря. С этой точки зрения, как известно из курса машин постоянного тока, отношение

$$k_a = \frac{2 (F_\delta + F_z)}{\alpha_i \tau A} \tag{45}$$

должно быть больше единицы.

Полагают величину $k_a = 1{,}2 - 1{,}5$ (для некомпенсированных машин).

При $F_z = cF_\delta$, $c = 0{,}2 - 0{,}5$, $\alpha_i \approx 0{,}7$ и, заменяя

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta',$$

получим

$$\delta' = (0{,}42 - 0{,}52) \frac{\mu_0 A\tau}{(1+c) B_\delta}; \qquad (46)$$

эффективный воздушный зазор

$$\delta' = k_C \delta,$$

где $k_C$ — коэффициент Картера, лежащий в пределах 1,1 — 1,2; $\delta$ — действительный воздушный зазор.

Употребляемые зазоры даны в табл. 57. Из технологических соображений величина зазора определяется [65]:

для якорей диаметром от 10 до 50 *см*

$$\delta = 0{,}009D \text{ см}; \qquad (46а)$$

для якорей, диаметр которых больше 50 *см*,

$$\delta = 0{,}1\,(4 + 0{,}008D)\,(1 + 0{,}0015l)\,(1 + 0{,}006v_a) \text{ см}. \qquad (46б)$$

Здесь $D$ и $l$ в *см*, $v_a$ в *м/сек*.

Размеры главного полюса и ярма.

Ширина и длина полюсного наконечника (рис. 180)

$$b_p = \alpha\tau; \ (\alpha = 0{,}7 - 0{,}75); \ l_p \approx l.$$

Ширина и длина полюсного сердечника

$$b_m = \frac{\sigma\Phi}{B_m l_m k_\text{п}}; \ l_m = l_p,$$

где $\sigma$ — коэффициент рассеяния полюсов

$$\sigma \approx 1 + \frac{(10 - 15)\,\delta}{\tau} + \frac{2\delta}{l}. \qquad (47)$$

Обычно $\sigma = 1{,}15 - 1{,}2$; более точно $\sigma$ по (48).

Высота полюсного наконечника

$$h_p = \frac{b_p - b_m}{4}.$$

При наличии компенсационной обмотки $h_p$ можно считать приближенно равной высоте паза компенсационной обмотки (§ 10-9). Высота полюсного сердечника $h_m$ определится более точно после расчета и размещения обмотки возбуждения. Предварительно ее можно принять

$$h_m = (0{,}7 - 0{,}9)\, b_p.$$

Для крупных машин

$$h_m \approx 0{,}025D + 20 \text{ см}.$$

При округлении найденных размеров желательно учесть возможность использования готовых штампов серийных машин.



Высота ярма

$$h_j = \frac{\sigma\Phi}{2B_j l_j}.$$

Длина ярма $l_j$ берется больше длины якоря, иногда $l_j = (1{,}5 - 2)\, l_m$ (рис. 161, 162).

Внутренний диаметр станины

$$D_j = D + 2\delta + 2h_m + 2h_p.$$

Наружный диаметр станины

$$D_{ja} = D_j + 2h_j.$$

При определении индукций в полюсах и в ярме необходимо учитывать увеличение потока вследствие рассеяния полюсов. Коэффициент рассеяния главных полюсов при холостом ходе

$$\sigma = 1 + \frac{4\mu_0 (F_\delta + F_{z1} + F_{j1})\, \Lambda_{s2}}{\Phi}. \qquad (48)$$

При низких и нормальных насыщениях можно принять $\sigma = \text{const}$ и определить его по (47). При больших насыщениях и при точных расчетах желательно определить $\sigma$ по (48). При этом полная проводимость путей рассеяния главных полюсов $\Lambda_{s_2}$ может быть рассчитана по формуле

$$\Lambda_{s_2} = \Lambda'_{sp} + \Lambda'_{sm} + \Lambda''_{sp} + \Lambda''_{sm},$$

где

$$\Lambda'_{sp} = \frac{l_p h'_p}{c_p - b_{p\text{к}}}; \quad \Lambda'_{sm} = \frac{l_m h_m}{2\,(c_m - b_{m\text{к}})};$$

$$\Lambda''_{sp} = \frac{b_p h'_p}{c_p + \frac{\pi}{2}(b_p - b_m)}; \quad \Lambda''_{sm} = \frac{b_m h_m}{2\,(c_m + \frac{\pi}{2} b_m)}.$$

Здесь $c_p = \tau - b_p$ и $c_m \approx \tau + \frac{\pi}{p} h_m - b_m$ — расстояния, указанные на рис. 16, $h'_p$ — по рис. 180.

При нагрузке величина $\sigma$ зависит от полной м. д. с. полюсов $i_f w_f$ при данных условиях нагрузки

$$\sigma = 1 + \frac{4\mu_0 i_f w_f \Lambda_{s2}}{\Phi}. \qquad (48а)$$

При расчете насыщения добавочных полюсов иногда бывает необходимым расчет коэффициента рассеяния добавочных полюсов $\sigma_\text{к}$. Формула для $\sigma_\text{к}$ приведена в примере расчета; при наличии зазора у ярма — $\sigma_\text{к}$ по формуле (70). Нормальная характеристика намагничивания в относительных единицах приведена на рис. 14.

## 10-7. ОБМОТКА ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Полная м. д. с. на пару полюсов $2F_f$ определится в результате расчета магнитной цепи. В нормальных машинах должно быть

$$F_f = k_\text{н} F_\delta,$$

где $k_н = 1{,}25 \div 1{,}5$ — коэффициент насыщения;

$F_\delta = \frac{\delta'}{\mu_0} B_\delta$ — м. д. с. на воздушный зазор.

По характеристике намагничивания и заданным условиям нагрузки требующаяся м. д. с. возбуждения определится следующим образом:

а) в шунтовых двигателях с регулированием скорости вращения $F_f$ равна максимальному значению м. д. с. при минимальной скорости вращения; в нерегулируемых двигателях $F_f$ равна м. д. с.

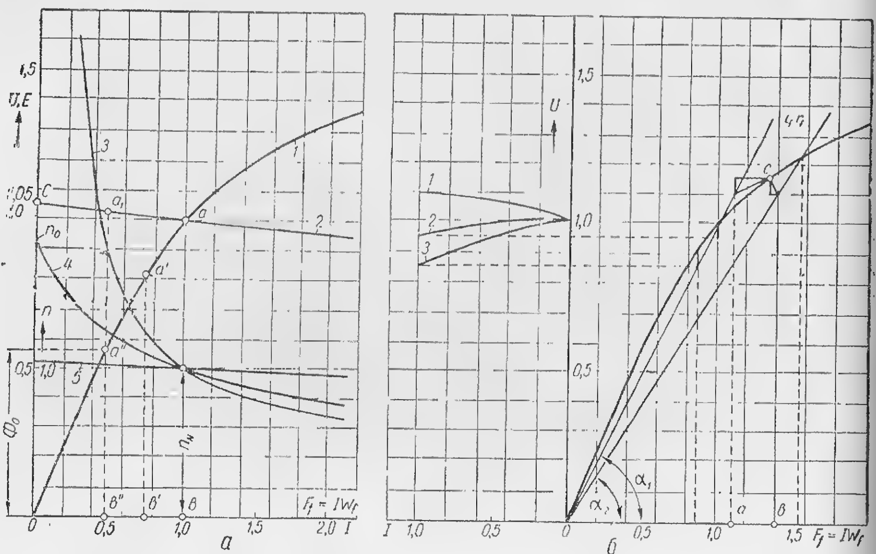



Рис. 176. Построение скоростных характеристик двигателей (*а*) и внешних характеристик генераторов (*б*) постоянного тока.

при номинальной скорости вращения на холостом ходу, т. е. практически $F_f$ соответствует $U_N = E_N$ по характеристике намагничивания;

б) в сериесных и компаундных двигателях величина $F_f$ определяется по желаемым характеристикам двигателя (табл. 56);

в) в шунтовых генераторах необходимо исходить из условий заказа, например, получения номинального напряжения при повышении нагрузки на 25%, или получения напряжения 1,05 от номинального при номинальной нагрузке;

г) в генераторах смешанного или компаундного возбуждения определение $F_f$ возможно из построения желаемой внешней характеристики, как показано ниже.

**Построение характеристик двигателей и генераторов при различных типах возбуждения и определение относительных м. д. с. возбуждающих обмоток.** Построение скоростных характеристик двигателей удобно вести в относительных единицах. На рис. 176, *а* кривой *1* представлена нормальная характеристика намагничивания в относительных единицах. Как известно,



$$\frac{n}{n_N} = \frac{E}{E_N}\frac{\Phi_N}{\Phi}.$$

Отношение э. д. с.

$$\frac{E}{E_N} = \frac{U - Ir}{U - I_N r}$$

получим, проведя прямую *2*, учитывающую падение напряжения $Ir$.

Отношение потоков $\frac{\Phi}{\Phi_N}$ в общем случае при смешанном возбуждении определяется отношением результирующих м. д. с.

$$\frac{i_f w_f + (w_s - w_a') I}{i_{fN} w_f + (w_s - w_a') I_N},$$

где $w_s$ — число витков последовательной обмотки возбуждения;

$w_a' I$ — размагничивающая реакция якоря,

$$w_a' = \frac{F_{\rho N} + F_{dN}}{I_N};$$

$F_{\rho N}$ и $F_{dN}$ — м. д. с. размагничивающей поперечной и продольной реакции якоря при $I = I_N$ (рис. 106).

Ток возбуждения $i_f$ и м. д. с. $i_f w_f$ шунтовой обмотки имеют постоянное значение — $ob''$. Если задать при номинальной нагрузке отношение м. д. с. $\frac{i_f w_f}{i_f w_f + (w_s - w_a') I_N}$, например 0,5, то $(w_s - w_a') I_N = b''b = ob''$, и мы получим по характеристике *1* точку $a'$, соответствующую потоку при нагрузке $0{,}5 I_N$, и точку $a''$, соответствующую потоку при холостом ходе $\Phi_0$.

Скорость при холостом ходе

$$n_0 = n_N \frac{U}{E_N}\frac{\Phi_N}{\Phi_0} = n_N \frac{oc}{ab}\frac{ab}{b''a''}.$$

Промежуточная скорость, например, для тока $I = 0{,}5$ получится по рис. 176, *а*

$$n = n_N \frac{a_1 b''}{ab}\frac{ab}{a'b'} = n_N \frac{a_1 b''}{a'b'} \text{ (кривая 4).}$$

Задаваясь отношением $\frac{n_N}{n_0}$, получим отношение ампер-витков

$$\frac{i_f w_f}{I(w_s - w_a')} = \frac{ob''}{b''b}.$$

Характеристика сериесного двигателя получится как частный случай компаундной при

$$\frac{i_f w_f}{I(w_s - w_a')} = 0 \text{ (кривая 3).}$$

При этом для $I = 0{,}5\ I_N$ $\quad n = n_N \frac{a_1 b''}{a''b''}$, для $I = 0$ $n = \infty$.

Характеристика шунтового двигателя представит другой крайний случай, когда $w_s = 0$ и

$$\frac{I(w_s - w'_a)}{i_f w_f} \approx 0 \text{ (кривая 5)}.$$

При этом $\frac{n}{n_N} \approx \frac{E}{E_N} = \frac{U - Ir}{U - I_N r}$.

В регулируемых двигателях характеристика намагничивания должна быть построена для минимальной скорости, принимаемой за номинальную $n_N$. Расчет скоростной характеристики сериесного двигателя приведен в табл. 56.

Построение внешних характеристик генераторов также удобно вести в относительных единицах (рис. 176, б). Задаваясь напряжением при номинальной нагрузке при данном сопротивлении шунтовой цепи и величине $I_N r$, получим на характеристике холостого хода точку $C$. Таким путем строим внешнюю характеристику генератора смешанного возбуждения (кривая 1), генератора с независимым возбуждением (кривая 2) и генератора с самовозбуждением (кривая 3). Как видно из рис. 176, б, м. д. с. сериесной сбмотки с учетом реакции якоря равна отрезку $ab$.

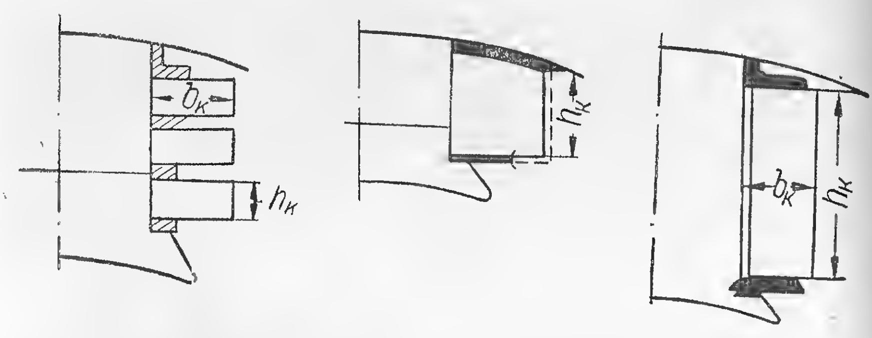



Рис. 177. Конструкции обмоток возбуждения.

Реакция якоря принята незначительной (щетки на нейтрали). Падение напряжения принято равным 5%. Для обеспечения равных напряжений при нагрузке для генератора с самовозбуждением потребовалось бы уменьшить сопротивление шунтовой обмотки в отношении $\frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1}$, а для генератора с независимым возбуждением— увеличить ток возбуждения до значения, определяемого точкой $b$.

Определение числа витков обмотки возбуждения (рис. 177). При последовательном возбуждении задан ток; поэтому

$$w_f = \frac{F_f}{I}.$$

При параллельном возбуждении задается напряжение на зажимах шунтовой обмотки. Из уравнений

$$U_f = i_f r_f \text{ и } r_f = \frac{2pw_f l_{wf}}{q_f c^2}\rho \qquad (49)$$



получаем сечение меди

$$q_f = \frac{2pF_f \rho l_{wf}}{U_f c^2}, \qquad (50)$$

где $c$ — число параллельных ветвей;

$l_{wf}$ — средняя длина витка:

$$l_{wf} = 2\left[l_m + b_m + \pi\left(b_1 + \frac{b_к}{2}\right)\right]; \qquad (51)$$

$b_к$ и $b_1$ — толщина катушки и толщина изоляции.

Число витков обмотки возбуждения может быть определено двумя путями:

1) задаемся плотностью тока $s$, тогда

$$i_f = q_f s \quad \text{и} \quad w_f = \frac{F_f}{i_f};$$

2) определяем общее полезное сечение меди $S_{Cu}$ на полюс, по эскизу рис. 177 с учетом $\varphi_f$ по (56); тогда

$$w_f = \frac{S_{Cu}}{q_f}, \quad i_f = \frac{F_f}{w_f}, \qquad (52)$$

после чего проверяется плотность тока

$$s = \frac{i_f}{q_f}. \qquad (53)$$

Плотность тока в сбмотке возбуждения выбирается 1,2÷2,5 *а/мм²* для неподразделенной катушки и 2,5÷4 *а/мм²* — для подразделенной хорошо сбдуваемой катушки (в зависимости от скорости охлаждаемого воздуха).

Для оценки величины $s = s_f$, так же как и в якоре, исходим из представления о допустимом удельном тепловом потоке с поверхности обмотки возбуждения

$$w_{Cuf} = \frac{p_f}{2pS_f}, \qquad (54)$$

где $p_f$ — полные потери в катушках;

$$S_f = h_k l_{wf} c_0, \qquad (55)$$

$S_f$ — поверхность охлаждения обмотки;

$h_k$ — высота сбмотки;

$c_0$ — коэффициент, равный отношению обдуваемого периметра катушки к высоте катушки; при неподразделенных катушках можно принять $c_0 = 1{,}2 \div 1{,}5$; при подразделенных катушках $c_0$ зависит от степени подразделения и может доходить до значений $3 \div 4$. При точных тепловых расчетах $c_0$ находится из конструктивного эскиза катушки.

Потери на полюс

$$\frac{r_f i_f^2}{2p} = s_f^2 \rho_{75} h_k b_k \varphi_f l_{wf}, \qquad (56)$$

где $b_k$ — ширина сечения обмотки;

$$h_k = \frac{i_f w_f}{b_k \varphi_f s_f};$$

$\varphi_f = \frac{q_f w_f}{b_k h_k} = \frac{\text{чистое сечение меди}}{\text{сечение катушки}}$ — коэффициент заполнения катушки. Величина $\varphi_f$ зависит от употребляемой меди: для тонкой круглой меди и большого числа витков $\varphi_f \approx 0{,}3$; для толстой квадратной меди и малого числа витков $\varphi_f \approx 0{,}4 \div 0{,}6$.

Подставляя (54) и (55) в (56), получаем

$$w_{Cuf} = \frac{s_f^2 \rho_{75} b_k \varphi_f}{c_0} \ вт/см^2. \tag{57}$$

Выше мы видели, что $w_{Cuf}$ определяется допустимым перепадом температуры между поверхностью катушки и воздухом

$$\theta_{Cuf} = \frac{w_{Cuf}}{\alpha_f}. \tag{57а}$$

Отсюда получаем допустимую плотность тока по нагреву обмотки, т. е. по допустимому перепаду температуры и ширине катушки,

$$s_f = \sqrt{\frac{c_0 \theta_{Cuf} \alpha_f}{\rho b_k \varphi_f}}. \tag{58}$$

Пусть, например, допустимая величина $\theta_{Cuf} = 40°C$, $c_0 = 1{,}5$; $\alpha_f = 0{,}00125\ (1 + 0{,}1 v_a)$ *вт/см² °С*, что при $v_a = 20$ *м/сек* дает $\alpha_f = 0{,}0035$ *вт/см² °С*, при $\varphi_f = 0{,}3$ и толщине катушки $b_k = 3{,}5$ *см*; $\rho_{75} = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *омсм* получим

$$s_f = \sqrt{\frac{1{,}5 \cdot 40 \cdot 0{,}0035}{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}3}} = 315 \ а/см^2 \ (3{,}15 \ а/мм^2).$$

Формула (58) является весьма показательной при выборе плотности тока и толщины катушки. Как видно, чем толще катушка, тем меньше допустимая плотность тока. Допустимая величина $\theta_{Cuf}$ обыкновенно равна 40÷50°С, так как для получения температуры обмотки $\overset{\circ}{\theta}_{Cuf}$ надо добавить внутренний перепад температуры в сечении катушки $\theta_i$, подогрев охлаждающего воздуха $\theta_a$ и температуру входящего воздуха $\overset{\circ}{\theta}_{a1}$, т. е.

$$\overset{\circ}{\theta}_{Cuf} = \theta_{Cuf} + \theta_i + \theta_a + \overset{\circ}{\theta}_{a1}. \tag{59}$$

Обыкновенно считается $\overset{\circ}{\theta}_{a1} = 35°C$, $\theta_i = 10 \div 15°C$ и $\theta_a = 5 \div 10°C$.

Для изоляции класса А при $\theta_{Cuf} = 40°C$ получим

$$\overset{\circ}{\theta}_{Cuf} = 40 + 15 + 10 + 35 = 100°C,$$

т. е. предельную по нормам температуру.

После выбора $s_f$ и подсчета числа витков и их сечения следует составить конструктивный эскиз магнитной системы с обмоткой, выбрать форму катушек и решить вопрос о подразделении катушек. Одновременно следует разместить на эскизе и обмотку добавочных полюсов.



## 10-8. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ И КОММУТАЦИИ

Средняя реактивная э. д. с. коммутируемой секции

$$e_р = 2 w_s v_a A l_i \zeta, \tag{60}$$

где $\xi$ — величина, пропорциональная коэффициенту рассеяния в пазах и лобовых частях короткозамкнутой секции, вычисляемая по формуле [53]

$$\zeta = \mu_0 \left[ c_п \frac{h_п}{b_п} + \frac{h_0}{b_0} + \frac{l_л}{l} + \frac{0{,}25 \cdot 10^6}{\frac{p}{a} A l_i w_s v_a} \right], \tag{61}$$

где $c_п \approx 0{,}6$ (для многоходовых и лягушечьих обмоток $\dot{c}_п \approx 0{,}3$).

По другому, более точному методу [98] вычисляется средняя индуктивность $L_1$ секции из $w_s$ витков при ширине щетки $b_щ$, большей коллекторного деления $t_к$ с учетом взаимоиндукции с другими секциями, находящимися в процессе коммутации $\left(\beta = \frac{b_щ}{t_к} > 1\right)$

$$L_1 = 2\mu_0 w_s^2 l_i (\Sigma\lambda)_{ср} = 2 w_s^2 l_i \zeta,$$

где $(\Sigma\lambda)_{ср}$ — средняя проводимость для потокосцепления секции с учетом взаимоиндукции, причем

$$(\Sigma\lambda)_{ср} = \lambda'_п + \lambda'_л + \lambda'_к;$$

$$\zeta = \mu_0 (\Sigma\lambda)_{ср};$$

$$\lambda'_п = 2u' \frac{\lambda_п}{\beta},$$

где $u'$ — равно отношению среднего значения реактивной э. д. с. паза с учетом всех короткозамкнутых щеткой секций к тому значению, которое было бы при ширине щетки, равной коллекторному делению, и при диаметральном шаге. Отношение $u'$ представлено в табл. 53 для различных значений абсолютной величины сокращения шага $\varepsilon = \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right|$.

*Таблица 53*

**Значения $u'$**

| $\beta$ | $u=2$ | | | | $u=3$ | | | $u=4$ | | | $u=5$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon=0$ | $\varepsilon=1$ | $\varepsilon=2$ | $\varepsilon=3$ | $\varepsilon=0$ | $\varepsilon=1\frac{1}{2}$ | $\varepsilon=3$ | $\varepsilon=0$ | $\varepsilon=2$ | $\varepsilon=4$ | $\varepsilon=0$ | $\varepsilon=3$ | $\varepsilon=5$ |
| 1,0 | 1,00 | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 1,00 | 0,75 | 0,5 | 1,00 | 0,75 | 0,50 | 1,00 | 0,70 | 0,50 |
| 1,5 | 1,33 | 1,08 | 0,75 | 0,67 | 1,44 | 1,055 | 0,78 | 1,50 | 1,17 | 0,79 | 1,54 | 0,97 | 0,79 |
| 2,0 | 1,50 | 1,25 | 0,875 | 0,75 | 1,67 | 1,33 | 0,92 | 1,75 | 1,375 | 0,94 | 1,80 | 1,05 | 0,95 |
| 2,5 | 1,60 | 1,4 | 1,05 | 0,85 | 1,93 | 1,57 | 1,13 | 2,10 | 1,70 | 1,175 | 2,23 | 1,36 | 1,14 |
| 3,0 | 1,67 | 1,5 | 1,17 | 0,92 | 2,11 | 1,78 | 1,28 | 2,33 | 1,92 | 1,33 | 2,46 | 1,77 | 1,32 |
| 3,5 | 1,72 | 1,57 | 1,28 | 1,035 | 2,24 | 1,93 | 1,45 | 2,575 | 2,16 | 1,535 | 2,77 | 2,05 | 1,68 |
| 4,0 | 1,75 | 1,63 | 1,37 | 1,125 | 2,33 | 2,06 | 1,58 | 2,75 | 2,34 | 1,69 | 3,00 | 2,33 | 1,75 |
| 5,0 | 1,79 | 1,69 | 1,47 | 1,30 | 2,44 | 2,21 | 1,80 | 2,95 | 2,60 | 1,98 | 3,20 | 2,70 | 2,13 |
| 6,0 | 1,83 | 1,75 | 1,58 | 1,49 | 2,55 | 2,38 | 2,03 | 3,17 | 2,86 | 2,26 | 3,4 | 3,06 | 2,42 |
| 7,0 | 1,85 | 1,79 | 1,64 | 1,5 | 2,61 | 2,48 | 2,11 | 3,28 | 3,04 | 2,50 | 3,35 | 3,32 | 2,84 |
| 8,0 | 1,87 | 1,81 | 1,69 | 1,56 | 2,66 | 2,53 | 2,26 | 3,33 | 3,15 | 2,67 | 4,00 | 3,53 | 2,95 |

Проводимости паза (§ 4-2) и лобовых частей (§ 4-4):

$$\lambda_п = \frac{h_0}{b_0} + \frac{1}{3}\frac{h_1}{b_1} \text{ (для открытого паза)}, \tag{62}$$

$$\lambda'_л = 0{,}1\frac{l_л}{l_i}\sqrt{\frac{l_л + \tau}{h_п + \beta(b_п + s_i) - s_i}}, \tag{62а}$$

где $s_i$ — расстояние между изолированными секциями в лобовой части.

Обычно $\lambda'_л \approx 0{,}5$; для магнитных бандажей $\lambda'_л = 0{,}75$.

Проводимость коронок зубцов

$$\lambda_к = \frac{b_z}{2\delta'_к} + 0{,}3, \tag{63}$$

где $\delta'_к$ — эффективный зазор под добавочным полюсом:

$$\delta'_к \approx (1{,}5 \div 2)\,\delta.$$

В крупных машинах с толчкообразной нагрузкой иногда принимают

$$\delta'_к = (3 \div 4)\,\delta.$$

Средняя реактивная э. д. с. при любых значениях $\beta$

$$e_р = -\left(L\frac{di}{dt}\right)_{ср} \approx \frac{2i_a}{T}L = \frac{2i_a\beta L_1}{\beta T_1}.$$

Если подставить в эту формулу

$$L_1 = 2\mu_0 w_s^2 l_i(\Sigma\lambda)_{ср} = 2w_s^2 l_i\zeta;$$

$$T_1 = \frac{1}{nK};\quad A = \frac{2w_s K i_a}{\pi D} \text{ и } v_a = \pi D n,$$

то получим

$$e_р = 2w_s v_a A l_i \zeta. \tag{64}$$

Допустимое значение реактивной э. д. с.: а) в машинах без добавочных полюсов в зависимости от сорта щеток $e_р \leqslant 2 \div 3$ *в* (при щетках на нейтрали); при сдвиге с нейтрали $e_р \leqslant 4$*в*; б) в машине с добавочными полюсами допустимая величина $e_р$ зависит от степени компенсации реактивного поля полем добавочных полюсов, а также от э. д. с. зубцовых пульсаций.

*При хорошей компенсации* и спокойной (без толчков нагрузки) работе машины $e_р$ может достигать 25 *в* и выше; при толчках нагрузки $e_р$ не выше 7*в*.

Благоприятным для коммутации является применение ступенчатых и лягушечьих обмоток.

Уменьшение э. д. с. зубцовых пульсаций может быть осуществлено соответствующим выбором шага секции. Благоприятным является сокращение шага секции $y_1$ на величину половины пазового деления якоря и скос полюсного наконечника на одно зубцовое деление якоря.



Электродвижущая сила, индуктированная от добавочного полюса в коммутируемой секции,

$$e_к = 2B_к w_s l_{iк} v_a. \tag{65}$$

Для хорошей компенсации

$$e_р \leqslant e_к.$$

Отсюда индукция под добавочным полюсом

$$B_к \geqslant A\zeta\frac{l_i}{l_{iк}}, \tag{66}$$

где $l_{iк}$ — расчетная длина добавочного полюса (обычно меньше длины якоря).

Зная $B_к$ и задаваясь воздушным зазором под добавочным полюсом $\delta_к$, получим необходимое число витков добавочного полюса

$$w_к = \frac{2\frac{B_к}{\mu_0}\delta_к + A(\tau - b_р) + \Sigma F_{Fe}}{2I} \tag{67}$$

для машины с компенсационной обмоткой и

$$w_к = \frac{2\frac{B_к}{\mu_0}\delta_к + A\tau + \Sigma F_{Fe}}{2I} \tag{68}$$

для машины без компенсационной обмотки.

Величину зазора $\delta_к$ можно определить, задаваясь отношением $\vartheta = \frac{F_к}{F_a}$ или для компенсированных машин $\vartheta = \frac{F_к + F_c}{F_a}$.

Для выполнения условия безыскровой коммутации практически достаточно, чтобы $\vartheta = 1{,}2 \div 1{,}35$. При этом

$$\delta_к = \frac{(\vartheta - 1)\,D \cdot 10^{-8}}{\zeta p}. \tag{69}$$

При расчете м. д. с. $\Sigma F_{Fe}$, равной $F_{mк} + F_{jк2} + F_z + F_{j1}$ (рис. 178), необходимо иметь в виду, что коэффициент рассеяния добавочных полюсов $\sigma_к$ у машин без компенсационной обмотки получается равным от 3 до 5 (вместо $1{,}15 \div 1{,}25$ в главных полюсах), а у машин с компенсационной обмоткой лежит в пределах от 2 до 3, т. е. поток в добавочном полюсе $\Phi_{mк} = \Phi_к\sigma_к$ и индукция $B_{mк} = \frac{\Phi_{mк}}{S_{mк}}$. Формула и расчет $\sigma_к$ даны в примере 1. Так как, однако, магнитная цепь добавочного полюса не должна быть насыщенной, то в результате должно быть

$$\Sigma F_{Fe} \ll \frac{2}{\mu_0}B_к\delta_к,$$

т. е. часто можно пренебречь величиной $\Sigma F_{Fe}$.

Для уменьшения рассеяния добавочного полюса и тем самым уменьшения вероятности чрезмерного насыщения полюса (при перегрузках машины), а также для регулирования зазора при настройке коммутации полученный зазор $\delta_к$ подразделяют на зазор между якорем и полюсным наконечником $\delta_к'$ и зазор между ярмом и добавочным полюсом $\delta_к''$.

Второй зазор получают с помощью немагнитных прокладок. Такое разделение зазора требуется в крупных прокатных двигателях и генераторах, одноякорных преобразователях, особенно при длинных в радиальном направлении добавочных полюсах. Обычно

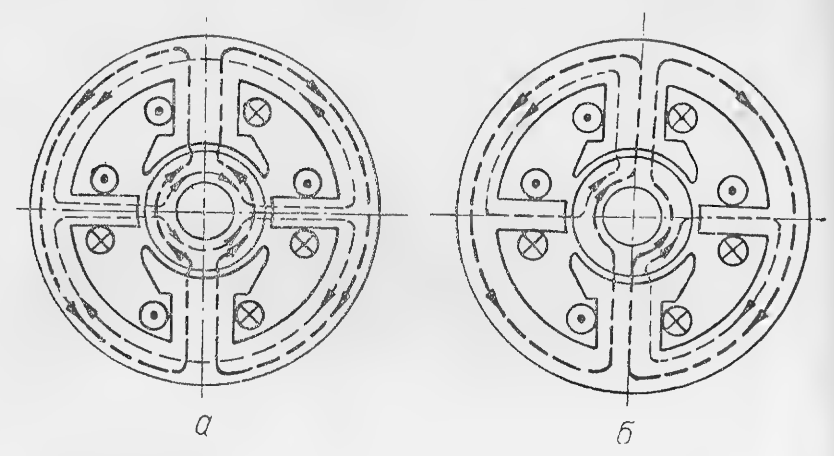



Рис. 173. К расчету намагничивания добавочных полюсов:
*а* — наложение фиктивных потоков цепи главных (жирный пунктир) и цепи добавочных (тонкий пунктир) полюсов в теле якоря и ярма; *б* — результирующий поток главных и добавочных полюсов.

$\delta_к''$ стремятся выбрать таким, чтобы выравнять индукции в обоих зазорах. С некоторым приближением уменьшение коэффициента рассеяния дополнительных полюсов вследствие подразделения зазора можно определить по формуле

$$\sigma_к = 1 + (\sigma_{к0} - 1)\frac{1}{1 + \frac{\delta_к'' f'}{\delta_к' f''}}, \tag{70}$$

где $\sigma_{к0}$ — коэффициент рассеяния при $\delta_к'' = 0$;

$f' = b_{рк} l_{рк}$ — сечение для потока в зазоре под полюсным наконечником;

$f'' \approx b_{тк}' l_{тк}$ — сечение для потока в зазоре у ярма.

Полезный поток добавочного полюса

$$\Phi_к = B_к b_{кi} l_{кi}, \tag{71}$$



где $l_{кi}$ — расчетная длина добавочного полюса, которая практически равна геометрической его длине $l_к$:

$$l_{кi} \approx l_к;$$

$b_{кi}$ — расчетная ширина наконечника добавочного полюса, определяемая шириной коммутационной зоны:

$$b_{кi} \approx b_{к.з} = b_щ \frac{D}{D_к} + \left\{u + \left|\frac{K}{2p} - y_1\right| - \frac{a}{p}\right\} t_k \frac{D}{D_к}, \tag{72}$$

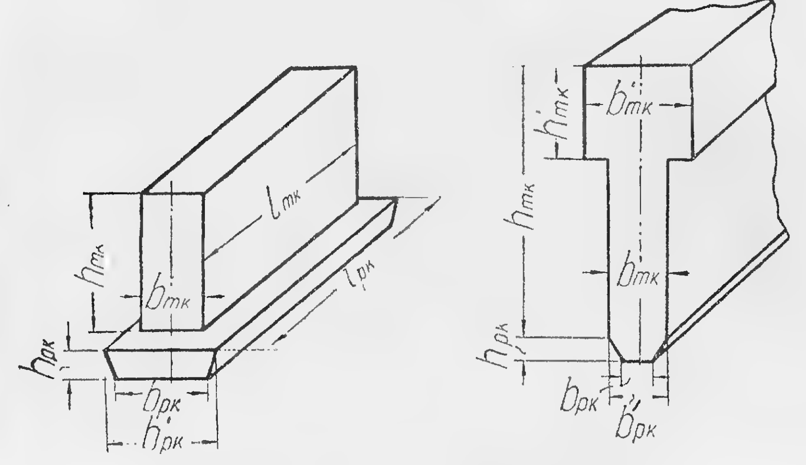


Рис. 179. Формы добавочных полюсов.

$b_щ \frac{D}{D_к}$ и $t_к \frac{D}{D_к}$ — ширина щетки и ширина коллекторного деления, приведенные к диаметру якоря, т. е. увеличенные в отношении $\frac{D}{D_к}$.

Сечение меди добавочных полюсов находится по допустимой плотности тока $s_к$, которую можно выбрать так же, как в § 10-7.

Формы добавочных полюсов представлены на рис. 179.

Коллектор и щетки. Диаметр коллектора и коллекторное деление выбираются согласно § 10-4.

При нормальных конструкциях окружная скорость коллектора $v_к$ не должна превышать 40 *м/сек* из условий коммутации, а также износа щеток и коллектора; обычно $v_к = 15 \div 25$ *м/сек*.

Плотность тока под щеткой $s_щ$ зависит от сорта щетки и приведена в приложении VII.

Сечение всех щеток одной полярности равно $S_к = \frac{I}{s_щ}$.

Ширина одной щетки $b_щ$ зависит от типа обмотки.

Примечание

**Рекомендуемые марки щеток**

а) для машин постоянного тока

| | |
|---|---|
| Машины мощностью от 1 до 20 *квт* | Г3, ЭГ2, ЭГ4 |
| Машины мощностью свыше 20 *квт* | Т6, ЭГ4, ЭГ8 |
| Прокатные двигатели | Т2, Г6, ЭГ2 |
| Генераторы для агрегатов «генератор-двигатель» | ЭГ2, ЭГ4, ЭГ6 |
| Машины с сильно переменной и толчкообразной нагрузкой | ЭГ2, ЭГ4, ЭГ10 |
| Машины большой мощности (напряжение свыше 100 *в*) | ЭГ2, ЭГ4, ЭГ8 |
| Машины с особо тяжелой коммутацией | Т2, ЭГ2, ЭГ14 |
| Быстроходные машины, турбогенераторы постоянного тока, возбудители | ЭГ4, ЭГ8, ЭГ83 |
| Тяговые двигатели | Т6, ЭГ14 |
| Крановые двигатели | Т2, ЭГ14 |
| Низковольтные генераторы (до 20 *в*) | ЭГ4, МГ, М16, М24 |
| Автомобильные машины | МГ, МГ6 |

б) для машин переменного тока

| | |
|---|---|
| Одноякорные преобразователи | ЭГ2, ЭГ6 |
| Коллекторные машины переменного тока | Т2, Т6, ЭГ2, ЭГ14 |
| Универсально-коллекторные двигатели и машины мощностью до 1 *квт* | Т2, ЭГ14 |
| Контактные кольца | Г3, ЭГ4, ЭГ83 |

При множественных и многократно замкнутых обмотках ($m > 1$, $t > 1$) щетка должна перекрывать число пластин, равное $m + 1$ или $t + 1$ (или больше). Обычно щетка перекрывает 2—3 коллекторные пластины. Ширина и длина щетки выбирается по стандарту (приложение VII). Следовательно, длина всех щеток на один болт будет равна

$$l_к = n_к l_щ = \frac{I}{s_щ p b_щ}. \tag{73}$$

Длина $l_к$ — называется полезной длиной коллектора. Число щеток на один болт $n_к$ будет равно $n_к = \frac{l_к}{l_щ}$. Полная длина коллектора делается всегда больше его полезной длины, так как щетки устанавливаются в щеткодержателях, занимающих место по длине, и необходим некоторый запас длины коллектора по оси.

Полная длина коллектора (см. рис. 193)

$$l'_к = l_к + (0{,}2 \div 0{,}3)\, n_к + (0{,}5 \div 1). \tag{74}$$

Расчет размеров пластин и допуски см. [1].

Следует сразу же проверить, достаточна ли выбранная длина коллектора в отношении нагрева. Проверка может быть произведена следующим образом.

Потери на трение щеток

$$p_{т.\,щ} = p_щ \mu_щ \cdot 2 S_к v_к\, 9{,}81 \ вт, \tag{75}$$

где $p_щ$ — давление на щетку от пружины щеткодержателя, $кг/см^2$ (обычно $p_щ = 0{,}2 \ кг/см^2$);
$\mu_щ$ — коэффициент трения щеток (приложение VII);
$S_к$ — площадь контакта щеток одной полярности, $см^2$;
$v_к$ — окружная скорость коллектора, *м/сек*.

Потери в переходном контакте

$$p_{п.\,к} = I \Delta U_щ, \tag{76}$$

где $\Delta U_щ$ — падение напряжения под щетками, зависящее от материала щетки и практически не зависящее от тока. Для угольных и графитных щеток $\Delta U_щ \approx 2 \ в$.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора в зависимости от окружной скорости представлен на рис. 64.

Удельный тепловой поток

$$w_{к.\,о} = \frac{p_{т.\,щ} + p_{п.\,к}}{\pi D_к l'_к} \ вт/см^2. \tag{77}$$

Перепад температуры на поверхности коллектора

$$\theta_к = \frac{w_{к.\,о}}{\alpha_к} \tag{78}$$

не должен превышать 65°С при изоляции обмотки класса А и 85°С при изоляции обмотки класса В.

Предельная мощность, которую можно снять с единицы поверхности коллектора,

$$\frac{P}{\pi D_к l_к} = \varepsilon_к s_щ \beta, \tag{79}$$

где $\beta$ — число пластин, перекрываемое щеткой (обычно $\beta = 2 \div 2{,}5$).

В нормальных машинах удельная мощность не превышает 150—200 $вт/см^2$ из условий коммутации.

## 10-9. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Линейная нагрузка компенсационной обмотки $A_c$, как это вытекает из назначения самой обмотки, должна быть равна линейной нагрузке якоря, т. е.

$$A_c = A = \frac{I}{2a}\frac{N}{\pi D}.$$

Линейная нагрузка компенсационной обмотки при $w_c$ витках компенсационной обмотки на пару полюсов

$$A_c = \frac{w_c 2 p I}{\pi D}\frac{\tau}{b_p}, \tag{80}$$

откуда

$$\frac{\tau}{b_p}\frac{w_c 2 p I}{\pi D} = \frac{IN}{2a\pi D}, \tag{81}$$

или

$$w_c = \frac{N}{2ap}\frac{b_p}{\tau}. \tag{82}$$

Компенсационная обмотка компенсирует реакцию якоря только в пределах полюсной дуги.

Выбрав плотность тока, которую можно принять равной или несколько выше плотности тока якоря, получаем сечение стержня

$$q_c = \frac{I}{2a_c s_c}, \tag{83}$$

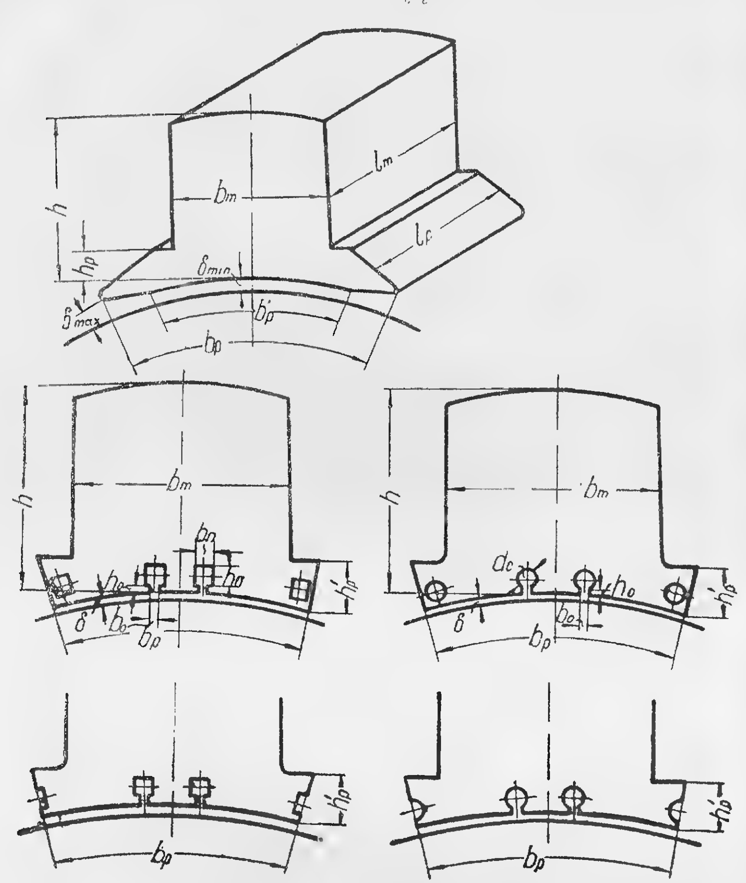


Рис. 180. Формы главных полюсов.

где $a_c$ — число параллельных ветвей компенсационной обмотки.

Различные формы пазов компенсационной обмотки показаны на рис. 180.

## 10-10. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И К. П. Д.

Потери в машинах подробно рассмотрены в гл. 5.

1. Потери в меди якоря

$$p_{Cu\,a} = I^2 r_a k_r, \tag{84}$$



где $k_r$ — коэффициент возрастания сопротивления от вихревых токов (рис. 181).

2. Потери в меди обмотки возбуждения

$$p_f = i_f^2 r_f. \tag{85}$$

3. Потери в меди дополнительных полюсов

$$p_{Cu\,к} = I^2 r_к. \tag{86}$$

4. Потери в меди компенсационной обмотки

$$p_c = I^2 r_c.$$

5. Потери на коллекторе по § 10-8.

6. Потери в железе якоря: в зубцах $p_z$ и в ярме $p_j$ по гл. 5 и примерам расчетов. Кроме того, по [102]

$$p_z = \frac{f(f + c_{1z})}{c_{2z}} \left(\frac{B_z}{10^{-4}}\right)^2 G_z, \tag{87}$$

$$p_j = \frac{f(f + c_{1j})}{c_{2j}} \left(\frac{B_j}{10^{-4}}\right)^2 G_j, \tag{88}$$

$$p_{Fe} = p_z + p_j.$$

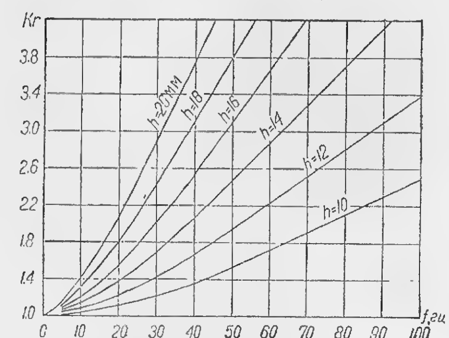



Рис. 181. Коэффициент возрастания сопротивления обмотки якоря при различных высотах проводника.

Постоянные $c_{1z}$, $c_{2z}$, $c_{1j}$, $c_{2j}$, зависящие от сорта стали с учетом увеличения потерь от обработки и от высших гармонических поля, могут быть взяты по табл. 54.

*Таблица 54*

**Постоянные для вычисления потерь в стали** (при $\Delta = 0,5$ *мм*)

| Марка стали | Коэффициенты | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $c_{1z}$ | $c_{2z}$ | $c_{1j}$ | $c_{2j}$ |
| Э11, Э12 | 30 | 350 | 70 | 500 |
| Э31 | 100 | 1300 | 200 | 1700 |
| Э41, Э42 | 100 | 1700 | 220 | 2300 |

7. Пульсационные потери в зубцах якоря и в полюсах рассчитываются по § 5-8.

8. Поверхностные потери на полюсах по § 5-7.

9. Механические потери $p_m$ (сумма потерь на трение и вентиляцию) по § 5-12; кроме того, по [102] механические потери подсчитываются по формулам:

а) машины с $D > 50$ *см* с подшипниками скольжения

$$p_m = k\left(\frac{v_a}{10}\right)^{1,6} \frac{P_N}{n_N} \frac{n}{100} \; квт, \tag{89}$$

где $k = 0{,}09 \div 0{,}13$; $P_N$, *квт*:

$v_a$ — окружная скорость, *м/сек*;

$n$ — скорость вращения, об/мин;

б) машины с $D < 50$ *см* с подшипниками скольжения

$$p_m = 1{,}75 v^2 V_a + 5\ G_a v_ц \sqrt{\frac{n}{p_ц}}\ вт, \tag{90}$$

где $v$ — для машин без вентилятора равно $v_a$, для машин с вентиляторами $v = v_2$;

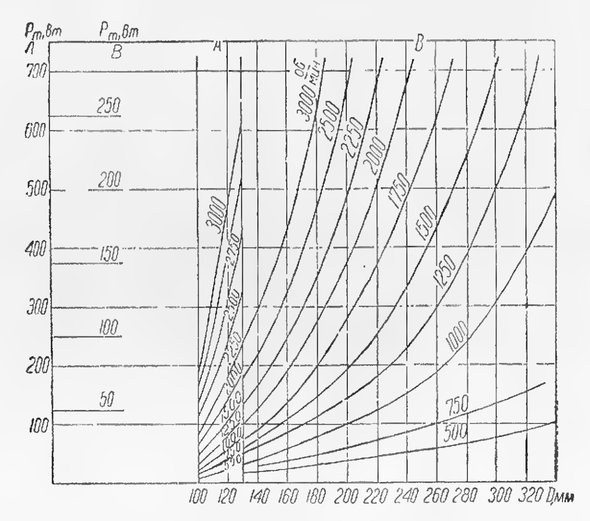



Рис. 182. Механические потери в машинах с подшипниками качения в функции диаметра якоря при различных скоростях вращения.

$v_2$ — максимальная окружная скорость вентилятора, *м/сек*;

$V_a$ — расход воздуха, $м^3/сек$;

$G_a$ — вес вращающихся частей, *кг*;

$v_ц$ — окружная скорость на цапфе, *м/сек*;

$p_ц$ — удельное давление на проекцию цапфы, $кг/см^2$;

$n$ — скорость вращения, об/мин.

Механические потери для машин с подшипниками качения приведены на рис. 182.

Кривая к. п. д. в функции нагрузки согласно § 10-2

$$\eta(x) = \frac{x}{x + k_1 + k_2 x + k_3 x^2};\ x = \frac{I}{I_N}\ \text{при}\ U = \text{const} = U_N.$$

Построение кривой к. п. д. покажем на следующих примерах [150].



Первый пример. Компенсированный шунтовой генератор $P_N = 2000$ *квт* $U_N = 500$ *в*, $n_N = 500$ об/мин.

1. Потери в железе $p_{Fe}$ = 30 *квт* (1,5%)
2. Механические $p_m = p_1 + p_v$ = 25 *квт* (1,25%)
3. Потери на трение щеток $p_{т.щ}$ = 10 *квт* (0,5%)
4. Потери в шунтовой обмотке $p_f$ = 6 *квт* (0,3%)

Итого: 71 *квт* (3,55% = $k_1$)

5. Потери в переходном контакте $p_{п.к}$ = 8 *квт* (0,4% = $k_2$)
6. Потери в обмотке якоря $p_a$ = 20 *квт* (1%)
7. Потери в добавочных полюсах $p_к$ = 4 *квт* (0,2%)
8. Потери в компенсационной обмотке $p_c$ = 10 *квт* (0,5%)
9. Добавочные потери $p_{доб}$ = 9 *квт* (0,45)

(пп. 6–9: $k_3 = 2{,}15\%$)

Суммарные потери $\sum p = 122$ *квт* (6,1%)

Подведенная мощность $P_1 = P_N + \sum p = 2122$ *квт*.
Коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}943$ (94,3%).
Данные расчета кривой к. п. д. сведены в табл. 55.

*Таблица 55*

**Кривая к. п. д. в функции нагрузки**

| Данные \ $x$ | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 |
|---|---|---|---|---|---|
| $x$ | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 |
| $k_1$ | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 |
| $k_2 x$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| $k_3 x^2$ | 0,535 | 1,075 | 1,61 | 2,15 | 2,7 |
| $\eta(x)$ | 86,9% | 92% | 93,8% | 94,3% | 95% |

Максимум к. п. д. будет при нагрузке

$$x = \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} = \sqrt{\frac{3{,}55}{2{,}15}} = 1{,}285\ (128{,}5\%\ \text{от}\ P_N).$$

Второй пример. Сериесный тяговый двигатель (133 *квт*, 800 *в*, 1000 об/мин).

В сериесных двигателях удобно исходить из характеристики намагничивания $\Phi = f(I)$ (табл. 56).

*Таблица 56*

**Построение характеристик для сериесных двигателей** ($U$ = const)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Поток, *вб*, $\Phi$ | 0,046 | 0,044 | 0,038 | 0,024 |
| Ток, *а*, $I$ | 215 | 165 | 97,5 | 47 |
| Э. д. с., *в*, $E = U - I\sum R$ | 750 | 761 | 776 | 787 |
| Скорость, об/мин, $n = \dfrac{E \cdot 60 \cdot a}{Np\Phi}$ | 995 | 1060 | 1250 | 2010 |
| Потери в железе, *квт*, $p_{Fe} = f(E,\ n)$ | 1,895 | 1,88 | 1,725 | 1,404 |
| Механические потери $p_m = f(n)$ | 1,46 | 1,575 | 1,935 | 3,550 |

*Продолжение табл. 56*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Потери в переходном контакте $p_{(п.к)} = f(I, n)$ | 0,43 | 0,33 | 0,195 | 0,095 |
| Потери в меди $p_{Cu} = p_a + p_к + p_c$ | 10,45 | 6,15 | 2,15 | 0,5 |
| Добавочные потери $p_{доб}$ | 0,96 | 0,64 | 0,31 | 0,09 |
| Сумма потерь $\sum p$ | 14,395 | 10,575 | 6,315 | 5,64 |
| Подведенная мощность $P_1 = UI \cdot 10^{-3}$ | 172,00 | 132,00 | 78,00 | 37,00 |
| Отдаваемая мощность $P_2 = P_1 - \sum p$ | 157,6 | 121,4 | 71,085 | 31,96 |
| К. п. д., %, $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ | 91,7 | 92 | 92 | 85 |
| Момент, *кгм*, $M = 975 \frac{P_2}{n}$ | 154 | 111,5 | 55,8 | 15,5 |

## 10-11. НАГРЕВ И ВЕНТИЛЯЦИЯ

Температура обмотки для машин постоянного тока не должна превышать предписанной по нормам для изоляции класса А (100° С), а для класса В (120° С), если температура определяется по методу измерения сопротивления обмотки. Тепло, выделяющееся в обмотке и железе якоря и в обмотке возбуждения, уносится вентилирующим воздухом. Определяющей величиной для расчета температуры является удельный тепловой поток $w$, т. е. отношение полных потерь в данной части машины к ее поверхности охлаждения (гл. 6 и 7).

Средний приведенный коэффициент теплоотдачи при открытой конструкции машины может быть принят равным

$$\alpha = \alpha_0' (1 + kv_a), \qquad (91)$$

где $v_a$ — окружная скорость якоря, *м/сек*;
$\alpha_0'$ и $k$ — постоянные (см. ниже).

Средний перепад температуры между охлаждающей поверхностью и воздухом

$$\theta_1 = \frac{w}{\alpha}. \qquad (92)$$

Для внешней поверхности якоря (с учетом каналов) $\alpha_0' \approx \alpha_{Fe} \approx 57 \div 67$ *вт/м² °С*; $k = 0{,}1$, если удельный тепловой поток $w$ вычисляется как $w = \frac{p_{Cu\,п} + p_{Fe}}{\pi D l}$.

Так, например, при окружной скорости якоря $v_a = 10$ *м/сек*, если допустить перепад температуры поверхности якоря над воздухом $\theta_1 = 40°$ С, то допустимый тепловой поток якоря, отнесенный к $\pi D l$, получится равным

$$w = \theta\alpha = 40 \cdot 60 (1 + 0{,}1 \cdot 10) = 4800 \text{ вт/м}^2.$$

Для многослойной обмотки возбуждения, выполненной из круглой или прямоугольной меди,

$$\alpha_f = 12{,}5 (1 + 0{,}04 v_a) \text{ вт/м}^2 {}^\circ\text{С}. \qquad (93)$$

Для однорядных обмоток

$$\alpha_f \approx 28 (1 + 0{,}1 v_a). \qquad (94)$$



Если в качестве поверхности охлаждения для катушек возбуждения брать только их внешнюю «обдуваемую» поверхность, что более правильно, то для $\alpha_f$ следует брать величины, соответствующие рис. 63 и довольно близко представляемые уравнениями:

$$\alpha_f = 12{,}5 (1 + 0{,}7 \sqrt{0{,}4 v_a}) \text{ вт/м}^2 {}^\circ C \qquad (95)$$

для многослойных катушек и

$$\alpha_f \approx 28 (1 + 0{,}7 \sqrt{0{,}5 v_a}) \text{ вт/м}^2 {}^\circ C \qquad (96)$$

для однослойных.

Для коллектора $\alpha_к = 50 (1 + 0{,}7 \sqrt{v_к})$, где $v_к$ — окружная скорость коллектора, *м/сек* (рис. 64).

Для увеличения интенсивности охлаждения и увеличения скорости охлаждающего воздуха устраивают центробежные или пропеллерные вентиляторы на валу якоря. Обычно воздух прогоняется через осевые или радиальные каналы якоря, омывает поверхности охлаждения катушек возбуждения и выбрасывается в отверстия для горячего воздуха в окружающее пространство (рис. 166).

Согласно гл. 6 среднее превышение температуры обмотки якоря

$$\theta_{ср} = \frac{\theta_1' l + \theta_1'' l_л}{l + l_л}, \qquad (97)$$

где $\theta_1'$ — условное превышение температуры активной части:

$$\theta_1' = \frac{w_{Cu} + w_{Fe}}{\alpha_{Fe}} + w_{Cu} \frac{t_1}{\Pi} \frac{\Delta_i}{k_i} + \theta_a; \qquad (98)$$

$w_{Cu}$ и $w_{Fe}$ — удельные тепловые нагрузки:

$$w_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{\frac{1}{2} l_{wa} \pi D}; \quad w_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{\pi D l};$$

$\Pi$ — периметр паза; $t_1$ — шаг паза.

$$\Pi = 2 (h_п + b_п);$$

$k_i$, $\Delta_i$ — коэффициент теплопроводности и толщина изоляции паза:

$$\Delta_i = \frac{b_п - b'_{Cu\,п}}{2},$$

$b'_{Cu\,п}$ — ширина меди паза с витковой изоляцией.

Эквивалентная теплоотдача от железа якоря $\alpha_{Fe}$:

а) для радиальной вентиляции

$$\alpha_{Fe} \approx \alpha_0 \frac{l_{Fe}}{l} \left[ (1 + \sqrt{v_\delta}) + \frac{0{,}6\tau}{l'} (1 + \sqrt{v_s}) \right], \qquad (99)$$

$$\alpha_0 = 14 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2 {}^\circ C.$$

При самовентиляции скорость воздуха в воздушном зазоре $v_\delta = \frac{1}{2} v_a$. Скорость воздуха у ярма принята $v_j \approx \frac{1}{2} v_a$. Отношение поверхности всех радиальных каналов к $\pi Dl$ приближенно равно $k_{ss} = \frac{0{,}6\tau}{l'}$. При отсутствии каналов $l' = l$;

б) для аксиальной вентиляции формула для $\alpha_{Fe}$ имеет тот же вид, но $\frac{l_{Fe}}{l} \approx 1$, а вместо $v_\delta$ надо подставить действительные средние скорости воздуха

$$v_\delta = \sqrt{(0{,}5v_a)^2 + v_{ав}^2}, \qquad (100)$$

где $v_{ав}$ — аксиальная составляющая скорости воздуха.

Отношение $k_{ss} = \frac{\Pi_a}{\pi D}$, где $\Pi_a$ — суммарный периметр всех аксиальных каналов.

$\alpha_0 \approx (18 \div 28)\, 10^{-4}$ *вт/см² °С* (меньшие цифры в машинах большей длины).

Условное превышение температуры в лобовой части

$$\theta_1'' = \frac{w_{Cu} t_1}{\alpha_л \Pi k_0} + \frac{w_{Cu} t_1 \Delta i}{\Pi k_i} + \theta_a, \qquad (101)$$

где $\alpha_л$ — удельная теплоотдача в лобовой части:

$$\alpha_л \approx 0{,}00167\,(1 + \sqrt{0{,}45 v_a})\ вт/см^2\,°C;$$

$k_0$ — коэффициент сдуваемости; зависит от степени закрытия лобовой части бандажами вентиляционных промежутков между секциями. Можно принять $k_0 = 0{,}5 \div 0{,}7$.

При известном расходе воздуха $V_a$ *м³/сек* и суммарных потерях $\sum p$ *квт* по гл. 6 $\Delta\theta_a = \frac{\sum p}{1{,}1 V_a}\ °C$; $\theta_a = \frac{1}{2}\Delta\theta_a$.

Можно задаться $\Delta\theta_a \approx 20 \div 30°\,C$. При этом получим потребный расход воздуха $V_a = \frac{\sum p}{1{,}1 \Delta\theta_a}$.

Если вентиляция лобовых частей затруднена (например вследствие их закрытия бандажами), то может оказаться, что $\theta_1'' \gg \theta_1'$ и тогда расчет по (97) даст завышенное значение $\theta_{ср}$. В этом случае необходимо пользоваться методом расчета, изложенным в гл. 6. При выборе размеров машин надлежит руководствоваться, кроме приведенных выше в методике графиков допустимых нагрузок, также данными построенных машин, сведенными в табл. 57.



# *ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА*

## *Пример 1*

### Расчет прокатного двигателя

#### I. Задание

Спроектировать реверсивный электродвигатель постоянного тока для индивидуального привода валков блуминга 4560 *квт*, 865 *в*, 70/120 об/мин. Возбуждение — независимое 110 *в*. Регулирование скорости вращения до 70 об/мин осуществляется измерением напряжения якоря, а от 70 до 120 об/мин — изменением тока возбуждения. Двигатель должен выдерживать часто повторяющиеся перегрузки при условии, что среднеквадратичный ток не будет превосходить номинального значения. Охлаждение принудительное.

Отношения моментов

а) при 70 об/мин

$$\frac{M_{max}}{M_N} = 2{,}5; \qquad \frac{M_{отк}}{M_N} = 2{,}75,$$

где $M_{отк}$ — предельный момент, при котором необходимо отключение двигателя (момент отключения);

$M_N$ — номинальный момент вращения:

$$M_N = 0{,}975\,\frac{P_{(квт)}}{n_{N\,(об/мин)}} = 0{,}975 \cdot \frac{4560}{70} = 63{,}5\ тм;$$

б) при 120 об/мин

$$\frac{M_{max}}{M_N} = 1{,}0; \qquad \frac{M_{отк}}{M_N} = 1{,}1.$$

Исполнение двигателя закрытое с принудительной вентиляцией.

Ток якоря

$$I = \frac{P}{U\eta} = \frac{4560 \cdot 10^3}{865 \cdot 0{,}92} = 5730a,$$

где $\eta$ — коэффициент полезного действия; по данным выполненных машин $\eta$ принят равным 92%.

#### II. Определение основных размеров и параметров якоря (§ 10-2)

1. Диаметр и длина. При выборе диаметра якоря двигателей для реверсивных прокатных станов необходимо ориентироваться на: а) минимум махового момента, от которого в значительной степени зависит производительность стана. Исходя из этого требования, диаметр якоря должен быть минимально возможным. Необходимость минимального диаметра якоря диктуется и соображениями минимального расстояния между валами двух двигателей, стоящих один над другим; б) обеспечение хорошей коммутации и допустимого нагрева якоря требует увеличения диаметра якоря; в) диаметр якоря ограничен допустимой окружной скоростью якоря $v_a < 60$ *м/сек*. На основании метода, изложенного в § 10-2, получаем

$$\frac{P}{n} = \frac{4560}{70} = 65{,}2\ \frac{квт}{об/мин}.$$

По рис. 173 для машин с принудительной вентиляцией находим

$$D = 250\ см;\ C_A = 13{,}6 \cdot 10^4\ \frac{см^3}{квт}\ \frac{об}{мин}.$$

Длина якоря

$$l = \frac{PC_A}{D^2 n} = \frac{4560 \cdot 13{,}6 \cdot 10^4}{250^2 \cdot 70} = 142\ см.$$

Таблица 57

**Данные выполненных машин постоянного тока**

| № по пор. | Основные данные | | | | | | Якорь | | | | | | | | Коллектор | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Режим работы | Мощность $P$ (в *квт*) | Напряжение $U$ (в *в*) | Ток $I$ (в *а*) | Скорость вращения (в об/мин) $n_N$ | Скорость вращения (в об/мин) $n_{max}$ | $D$ (в *см*)/$D_{j_1}$ (в *см*) | Длина $l$ (в *см*) | Число радиальных каналов | Число аксиальных каналов / Диаметр (в *мм*) | $2a$ | Число пазов $Z$ | Размер паза $b_п \times h_п$ (в *мм*) | Размер меди (в *мм*) | $D_к$ (в *см*) | $K$ | Число щеток на болт | Размер щеток (в *мм*) |
| 1 | двиг. | 0,52 | 220 | — | 1450 | — | 9,8/ | 9,0 | — | — | 2 | 14 | — | 0,55/0,7 | 6,4 | 56 | — | — |
| 2 | » | 1,75 | 220 | — | 1450 | — | 13,0/ | 11,8 | — | — | 2 | 20 | — | 0,93/1,09 | 8,0 | 80 | — | — |
| 3 | » | 4,4 | 220 | — | 1500 | — | 16/ | 10,0 | — | — | 4 | 29 | — | 1,25/1,43 | 12,5 | 87 | — | — |
| 4 | » | 9,0 | 220 | — | 1500 | — | 18,5/ | 16,0 | — | — | 4 | 31 | — | 1,25/1,43 | 12,5 | 93 | — | — |
| 5 | » | 19 | 220 | 101,5 | 1500 | — | 21,0/6,0 | 12,5 | — | 14/17 | 2 | 31 | 7,75×27 | $\frac{1,45 \times 4,7}{1,72 \times 4,97}$ | 15,0 | 93 | 2 | 12,5×25 |
| 6 | » | 25 | 220 | 132,5 | 1500 | — | 21,0/6,0 | 16,5 | — | 14/17 | 2 | 37 | 6,5×27 | $\frac{1,68 \times 4,7}{1,95 \times 4,97}$ | 15,0 | 73 | 3 | 12,5×25 |
| 7 | » | 32 | 220 | 170 | 1500 | — | 24,5/7,0 | 13,5 | — | 20/17 | 2 | 37 | 8×27 | $\frac{1,08 \times 4,7}{1,36 \times 4,97}$ | 18,0 | 147 | 3 | 16×25 |
| 8 | — | 46 | 220 | 233 | 940 | — | 34/8,5 | 14,0 | — | 24/22 | 2 | 43 | 8,7×41 | 2 (1,16 × 8) | 25,0 | 171 | 3 | 16×32 |
| 9 | — | 105 | 220 | 525 | 965 | — | 41/10 | 20,0 | — | 30/22 | 4 | 46 | 10,2×41 | 2 (1,56 × 8) | 30,0 | 184 | 5 | 20×32 |
| 10 | — | 107 | 220 | 830 | 970 | — | 47,5/12 | 22,0 | — | 30/22 | 4 | 70 | 8,1×46 | 2 (2,44 × 9,3) | 35,0 | 140 | 7 | 25×32 |
| 11 | — | 150 | 220 | 775 | 350 | 1400 | 55/16 | 35,0 | 4 | — | 4 | 58 | 10,2×45 | 2 (2,1 × 8) | 39,0 | 174 | 6 | 25×32 |
| 12 | генер. | 380 | 600 | 634 | 1000 | — | 67,5/35 | 23,0 | 3 | — | 4 | 62 | 13,4×37 | 2,26 × 12,5 | 50,0 | 248 | 4 | 20×32 |
| 13 | » | 600 | 750 | 800 | 1000 | — | 75/41 | 31,0 | 4 | | 6 | 87 | 11,5×44 | 2 (1,68 × 6,9) | 55,0 | 348 | 6 | 2 (10×32) |
| 14 | — | 1380 | 660 | 2000 | 1000 | — | 99/53 | 35,0 | 5 | — | 12 | 117 | 10,5×45 | 2 (2,1 × 6,9) | 65,0 | 351 | 6+4 | 2 (10×32) |
| 15 | двиг. | 2000 | 750 | 2840 | 480 | 780 | 120/70 | 60,0 | 8 | — | 12 | 123 | 13,5×45 | 2 (3,05 × 6,9) | 80,0 | 369 | 6+7 | 2 (12,5×32) |
| 16 | генер. | 2000 | 750 | 2670 | 600 | — | 150/110 | 33,0 | 5 | — | 10 | 145 | 14,9×45 | 2 (3,53 × 6,9) | 100,0 | 435 | 9 | 2 (10×32) |
| 17 | двиг. | 1000 | 600 | 1800 | 210 | 300 | 180/143 | 33,0 | 5 | — | 12 | 210 | 12,8×49 | 2 (1,95 × 8) | 130,0 | 840 | 5 | 2 (12,5×32) |
| 18 | — | 3200 | 750 | 4530 | 320 | 520 | 215/160 | 45,0 | 7 | — | 20 | 215 | 12,2×49 | 2 (2,63 × 8) | 130,0 | 645 | 13 | 2 (12,5×32) |
| 19 | двиг. | 2000 | 750 | 2900 | 125 | 300 | 215/160 | 65,0 | 9 | — | 10 | 175 | 15,7×49 | 2 (3,8 × 6,9) | 130,0 | 525 | 10 | 2 (10×32) |
| 20 | — | 3680 | 700 | 5670 | 65 | 120 | 285/235 | 120,0 | 17 | — | 28 | 357 | 10×58 | 2 (1,81 × 10,8) | 190,0 | 1071 | 13 | 25×32 |
| 21 | — | 2000 | 900 | 2450 | 30 | — | 380/340 | 80,0 | 12 | — | 12 | 330 | 16,7×60 | 2,1 × 22,6 | 315,0 | 1650 | 4 | 25×32 |
| 22 | — | 7400 | 860 | 9200 | 60 | 90 | 380/330 | 125,0 | 17 | — | 40 | 510 | 10,8×63 | 2 (2,1 × 10,8) | 315,0 | 1530 | 10 | 2 (16×32) |
| 23 | генер. | 1000 | 600 | 1670 | 2750 | — | 61/32 | 41,0 | 9 | — | 4 | 72 | 15×37 | 3 (3 × 12,5) | 40,0 | 144 | 8 | 25×50 |

| № по пор. | Главные полюса | | | | | | | Вспомогательные полюса | | | | Станина | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Компенсацион. обмотка | | | | | | | | | |
| | α | δ (в *мм*) | Размеры сердечника $b_m \times l_m$ | Размер паза (в *мм*) | Число пазов | Число параллельных ветвей | Размер меди (в *мм*) | Размеры сердечника (в *см*) | Число витков на полюс | Число параллельных ветвей | Размер меди (в *мм*) | Сечение (в $см^2$) | Внутренний диаметр (в *см*) |
| 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | 340 | — | 1,08/1,26 | — | — |
| 2 | — | — | — | — | — | — | — | — | 212 | — | 2,1/2,4 | — | — |
| 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | 70 | — | 1,56 × 4,4 / 1,81 × 4,65 | — | — |
| 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | 40 | — | 2,83 × 5,1 / 3,13 × 5,4 | — | — |
| 5 | 0,63 | 1,5 | 6,2 × 12,5 | — | — | — | — | 2,5 × 12,5 | 30 | — | 4,4 × 7,4 / 4,84 × 7,84 | — | 42,8 |
| 6 | 0,63 | 1,5 | 6,2 × 16,5 | — | — | — | — | 2,5 × 16,5 | 24 | — | 4,7 × 7,4 / 5,14 × 7,84 | — | 42,8 |
| 7 | 0,64 | 2,0 | 7,4 × 13,5 | — | — | — | — | 3 × 13,5 | 24 | — | 2,63 × 15,6 / — | — | 49,8 |
| 8 | 0,637 | 4,0 | 11 × 13,5 | — | — | — | — | 3,5 × 13,5 | 26 | — | 2 (1,35 × 30) | 97,5 | 59 |
| 9 | 0,652 | 4,0 | 15 × 19,5 | — | — | — | — | 4,0 × 18,5 | 15 | — | 5,1 × 30 | 166,5 | 70 |
| 10 | 0,637 | 4,5 | 17,5 × 21,5 | — | — | — | — | 3,5 × 21,0 | 11 | — | 9 × 30 | 209 | 81 |
| 11 | 0,72 | 6,0 | 24 × 34 | 19,5 × 35 | 8 | — | 8 × 25 | 4,5 × 32,0 | 6 | — | 2 (7 × 19,5) | 261 | 96 |
| 12 | 0,70 | 5,0 | 19 × 22 | — | — | — | — | 5,0 × 20,0 | 13 | — | 11 × 20 | 246 | 115 |
| 13 | 0,70 | 5,0 | 21 × 30 | 8,8 × 48 | 14 | — | 6 × 40 | 5,0 × 28,0 | 6 | — | 14 × 20 | 357 | 132 |
| 14 | 0,70 | 6,5 | 29 × 34 | 10,8 × 53 | 14 | 2 | 8 × 45 | 7,0 × 35,0 | 6 | 2 | 12,5 × 25 | 580 | 156,5 |
| 15 | 0,75 | 7,0 | 39 × 59 | 16,8 × 53 | 8 | — | 14 × 45 | 6,5 × 60,0 | 5 | 2 | 20 × 20 | 1240 | 185 |
| 16 | 0,70 | 7,0 | 27 × 32 | 10,8 × 53 | 12 | 2 | 8 × 45 | 6,5 × 33,0 | 5 | 2 | 20 × 20 | 525 | 215 |
| 17 | 0,70 | 6,5 | 27 × 32 | 15,3 × 53 | 8 | — | 12,5 × 45 | 6,5 × 33,0 | 3 | — | 20 × 30 | 525 | 423 |
| 18 | 0,75 | 7,0 | 42,5 × 44 | 15,3 × 53 | 10 | 2 | 12,5 × 45 | 8,5 × 45,0 | 3 | 2 | 16 × 40 | 1105 | 285 |
| 19 | 0,75 | 7,0 | 42,5 × 64 | 18,8 × 53 | 8 | — | 2 (8 × 45) | 8,5 × 65,0 | 5 | 2 | 2 (8 × 25) | 1600 | 285 |
| 20 | 0,75 | 7,0 | 41,5 × 119 | 22,8 × 58 | 8 | 2 | 20 × 50 | 8,5 × 120,0 | 3 | 2 | 20 × 50 | 2880 | 355 |
| 21 | 0,695 | 7,0 | 29 × 79 | 17,8 × 58 | 8 | — | 15 × 50 | 9,0 × 80,0 | 3 | — | 15 × 50 | 1450 | 450 |
| 22 | 0,746 | 7,0 | 35,5 × 124 | 12,8 × 58 | 12 | 2 | 10 × 50 | — × 125,0 | 2 | 2 | 12,5 × 100 | 2700 | 450 |
| 23 | 0,68 | 10,0 | 22 × 32 | 17 × 35 | 12 | — | 13 × 30 | 6,0 × 25,0 | 3 | — | 6,5 $см^2$ | — | — |

Проверяем выполнимость машины при этой длине по кривым рис. 174 при $n_{max} = 120$ об/мин.

2. Окружная скорость якоря:

а) при основной скорости вращения

$$v_{aN} = \frac{\pi 250 \cdot 70}{60} 10^{-2} = 9{,}15 \; м/сек;$$

б) при максимальной скорости вращения

$$v_{a\,max} = \frac{\pi 250 \cdot 120}{60} 10^{-2} = 15{,}7 \; м/сек.$$

3. Число пар полюсов. Согласно гл. 2 оптимальное отношение $\beta = \frac{\tau}{l}$ для машин $4 \div 5$ тыс. *квт* лежит в пределах $0{,}4 \div 0{,}6$. Отсюда находим

$$\tau = \beta l = 0{,}5 \cdot 142 = 71 \; см.$$

Современные высокоиспользованные крупные двигатели и генераторы имеют полюсное деление до 70 *см*. Это объясняется необходимостью применения двухходовых обмоток для обеспечения достаточно низкого напряжения между коллекторными пластинками (междуламельного напряжения) при достаточной ширине пластины (ламели) и лучшего использования якоря. Следовательно,

$$2p = \frac{\pi D}{\tau} = \frac{\pi 250}{70} = 11{,}2.$$

Округляя, получим $2p = 12$. Полученная величина не выходит за пределы, указанные в табл 48.

4. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3{,}14 \cdot 250}{12} = 65{,}5 \; см.$$

5. Частота перемагничивания:

$$f_N = pn = \frac{6 \cdot 70}{60} = 7 \; гц;$$

$$f_{max} = \frac{6 \cdot 120}{60} = 12 \; гц.$$

6. Полюсное перекрытие $\alpha$ согласно гл. 3 принимаем равным 0,74.

7. Длина полюсной дуги

$$b_p = \alpha\tau = 0{,}74 \cdot 65{,}5 = 48{,}5 \; см.$$

8. Воздушный зазор

$$\delta = (0{,}01 \div 0{,}015)\,\tau = (0{,}01 \div 0{,}015)\,65{,}5 = (0{,}655 \div 0{,}98) \; см,$$

или

$$\delta = 0{,}1\,[(4 + 0{,}8D)(1 + 0{,}15l)(1 + 0{,}006 v_a)] =$$
$$= 0{,}1\,[(4 + 0{,}8 \cdot 2{,}5)(1 + 0{,}15 \cdot 1{,}42)(1 + 0{,}006 \cdot 15{,}7)] = 0{,}83 \; см$$

Принимаем $\delta = 8$ *мм*.

9. Расчетная длина полюсной дуги

$$b_i = b_p + 2\delta = 48{,}5 + 2 \cdot 0.8 = 50{,}1 \; см.$$

10. Расчетное полюсное перекрытие

$$\alpha_i = \frac{b_i}{\tau} = \frac{50{,}1}{65{,}5} = 0{,}765.$$

## III. Выбор обмотки якоря (§ 10-4)

Так как ток параллельной ветви не должен превышать 250—300 *а*, то в случае применения двухходовой петлевой обмотки с $2a = 4p$

$$2a = \frac{I}{250 \div 300} = \frac{5730}{250 \div 300} = 24 \div 20.$$



Однако, учитывая, что лягушечья обмотка более совершенна в отношении коммутации, чем петлевая, и не нуждается в уравнительных соединениях, что значительно повышает надежность машины, принимаем двухходовую лягушечью обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 4p \cdot 2$. Учитывая относительную тихоходность машины, лягушечью обмотку примем разрезной, что улучшит заполнение паза и облегчит намотку якоря.

Ток параллельной ветви

$$i_a = \frac{I}{8p} = \frac{5730}{48} = 119{,}25 \; a.$$

Желая получить возможно меньшую длину машины и учитывая наличие принудительной вентиляции, при предварительных расчетах примем линейную нагрузку якоря $A = 580$ *а/см*. Тогда число активных проводников обмотки якоря

$$N = \frac{\pi D A}{i_a} = \frac{\pi 250 \cdot 580}{119{,}25} = 3820.$$

Число коллекторных пластин (ламелей) для лягушечьей обмотки

$$K = \frac{N}{2 \cdot 2w_s} = \frac{3820}{2 \cdot 2 \cdot 1} = 955.$$

Величина междуламельного напряжения

$$\varepsilon_{к.\,ср} = \frac{2pU}{K} = \frac{12 \cdot 865}{955} = 10{,}88 \; в.$$

При одноходовой обмотке $\varepsilon_{к.\,ср}$ равнялось бы 21,66 *в*, что недопустимо.

## IV. Длина якоря и каналы (§ 10-5)

1. Предварительно принимаем падение напряжения в цепи якоря

$$\Delta U = {}^2/_3\,(100 - \eta\%)\,U \approx 5\% U; \; \Delta U = 0{,}05 \cdot 865 = 43 \; в.$$

Внутренняя э. д. с.

$$E = U - \Delta U = 865 - 43 = 822 \; в.$$

Поток якоря (ориентировочно)

$$\Phi = \frac{E}{N \frac{p}{a} n_N} = \frac{822}{3820 \frac{1}{4} \cdot \frac{70}{60}} = 0{,}738 \; вб.$$

2. Расчетная длина якоря

$$l_i = \frac{\Phi}{b_i B_\delta} = \frac{0{,}738 \cdot 10^4}{50{,}1 \cdot 1{,}05} = 140{,}5 \; см,$$

где $B_\delta$ — индукция в воздушном зазоре, которая, учитывая наличие принудительной вентиляции, выбрана 10 500 *гс* (1,05 *вб/м²*, $1{,}05 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*).

3. Полная длина якоря

$$l = l_i + n_s b_s'' = 140{,}5 + 19 \cdot 0{,}2 = 144{,}3 \; см,$$

где по § 3—2 при $b_s = 1$ *см*

$$b_s'' = b_s \frac{\frac{b_s}{5\delta}}{1 + \frac{b_s}{5\delta}} = 1 \frac{\frac{1}{4}}{1 + \frac{1}{4}} = 0{,}2.$$

Предварительно задаваясь средней шириной пакета $l' = 6{,}5$ *см*, получаем число пакетов якоря $n' = 20$; при этом число каналов

$$n_s = n' - 1 = 20 - 1 = 19.$$

Округляем значение $l$ до 145 *см*.

Для облегчения условий охлаждения внутренних частей якоря, как наиболее нагретых, распределение длин пакетов делаем следующим образом: 6 пакетов с каждой стороны делаем длиной по 6,5 *см*, а внутренние 7 пакетов — по 6 *см*.

Уточняем расчетную длину якоря

$$l_i = 145 - 19 \cdot 0{,}2 = \mathbf{141{,}2}\ \textit{см}.$$

4. Длина пакетов железа якоря

$$l_1 = l - n_s b_s = 145 - 19 \cdot 1 = 126\ \textit{см}.$$

5. Длина чистого железа якоря

$$l_{Fe} = l_1 k_п = 126 \cdot 0{,}93 = \mathbf{117}\ \textit{см},$$

где $k_п = 0{,}93$ — коэффициент заполнения железа якоря.

## V. Число пазов якоря (§ 10-4)

1. Число пазов якоря $Z$. Выбираем сначала число сторон секций одного слоя в пазу $u$. Двухходовая лягушечья обмотка, как известно, выполнима при нечетных значениях $u = 1, 3$ или 5. Вариант с $u = 1$ мало приемлем из-за плохого заполнения зубцовой зоны. Для выбора более приемлемого варианта рассмотрим величины объема тока в пазу и зубцовых делений по окружности якоря в случае $u = 3$ и $u = 5$.

При $u = 3$:

объем тока в пазу $2 \cdot 2ui_a = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 119{,}25 = 1431\ a$;

число пазов
$$Z = \frac{N}{2 \cdot 2u} = \frac{3820}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 318;$$

зубцовое деление
$$t_{z_1} = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 250}{318} = \mathbf{2{,}47}\ \textit{см}.$$

При $u = 5$:

$$2 \cdot 2ui_a = 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 119{,}25 = 2385a; \quad Z = \frac{3820}{2 \cdot 2 \cdot 5} = 191;$$

$$t_{z_1} = \frac{\pi 250}{191} = 4{,}12\ \textit{см}.$$

Вариант с $u = 5$ неприемлем как по величине объема тока в пазу, который не должен быть более 2000 $a$ даже для хорошо вентилируемых машин, так и по величине зубцового деления, которое не должно быть более 4 *см* из-за недопустимых пульсаций магнитного потока. Следовательно, принимаем $u = 3$.

По условиям симметрии и удовлетворительной коммутации отношение $\frac{Z}{p}$ должно быть целым нечетным:

$$\frac{Z}{p} = \frac{318}{6} = 53.$$

Следовательно, число пазов оставляем без изменений.

2. Число активных проводников якоря

$$N = 2 \cdot 2uZ = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 318 = 3816.$$

Число проводников в пазу

$$s_п = \frac{N}{Z} = \frac{3816}{318} = 12.$$

3. Уточняем величину линейной нагрузки, потока и индукции в зазоре:

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D} = \frac{3816 \cdot 119{,}25}{\pi \cdot 250} = 580\ \mathbf{a/см};$$

$$\Phi = 0{,}738 \cdot \frac{3820}{3816} = 0{,}738\ \textit{вб}\ (73{,}8 \cdot 10^6\ \textit{мкс});$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{b_i l_i} = \frac{0{,}738}{50{,}1 \cdot 141{,}2} = \mathbf{1{,}04 \cdot 10^{-4}}\ \mathbf{вб/см^2}.$$



## VI. Коллектор (§ 10-4, § 10-8)

1. Число коллекторных пластин (ламелей)

$$K = Zu = 318 \cdot 3 = 954.$$

2. Желая получить возможно меньший диаметр коллектора и исходя из того, что величина коллекторного деления $t_к$ для крупных машин не должна быть меньше 0,55 *см*, получим

$$D_к = \frac{Kt_к}{\pi} = \frac{954 \cdot 0{,}55}{3{,}14} = 167\ \textit{см}.$$

Округляя полученную величину диаметра до ближайшего большего (§ 10-4), получим $D_к = \mathbf{170}$ **см**.

3. Коллекторное деление

$$t_к = \frac{\tau D_к}{K} = \frac{\pi \cdot 170}{954} = \mathbf{0{,}56}\ \textit{см}.$$

Толщина междуламельной изоляции $\beta_l = \mathbf{0{,}1}$ *см*; толщина ламели $\beta_к = 0{,}46$ *см*.

## VII. Размеры меди, уточнение размеров паза и изоляция обмотки (§ 10-5)

1. Размеры обмоточной меди якоря. Обмотка выполняется из голой обмоточной меди. Поскольку изоляция крупных прокатных двигателей относится к классу $B$ и вентиляция принята принудительной, можно допустить тепловую нагрузку $A \cdot s_a \approx 3000$. Исходя из этого, плотность тока может быть принята до

$$s_a = \frac{3000}{580} = 5{,}16\ a/\textit{мм}^2.$$

Предварительная высота паза

$$h_п = \frac{A}{s_a \lambda \varphi_{Cu}} = \frac{580}{500 \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}4} \approx 6{,}5\ \textit{см}.$$

Обычно для крупных машин высота клина $h_к = 5$ *мм*.

Согласно приложению IV толщина изоляции по высоте для разрезной лягушечьей обмотки $\Delta h = 9{,}1$ *мм*. Следовательно, для меди остается $65 - 9{,}1 - 5 = 50{,}9$ *мм*.

Так как принятая лягушечья обмотка по высоте паза имеет четыре проводника $u = 4$, то каждый проводник может быть принят высотой

$$h = \frac{50{,}9}{4} = 12{,}75\ \textit{мм}.$$

При выбранной плотности тока $s_a = 5\ a/\textit{мм}^2$ потребное сечение проводника

$$q_{Cu} = \frac{i_a}{s_a} = \frac{119{,}25}{5} = 23{,}9\ \textit{мм}^2.$$

Ориентировочная толщина обмоточной меди

$$b = \frac{q_{Cu}}{h} = \frac{23{,}9}{12{,}75} = 1{,}874\ \textit{мм}.$$

Выбираем стандартную обмоточную медь по ГОСТ 434—41 с размерами

$$b \times h = 1{,}81 \times 12{,}5 = \mathbf{22{,}4}\ \mathbf{мм^2}.$$

Плотность тока в обмотке якоря и тепловая нагрузка

$$s_a = \frac{119{,}25}{22{,}4} = \mathbf{5{,}32}\ \mathbf{a/мм^2};$$

$$A \cdot s_a = 580 \cdot 5{,}32 = \mathbf{3090}.$$

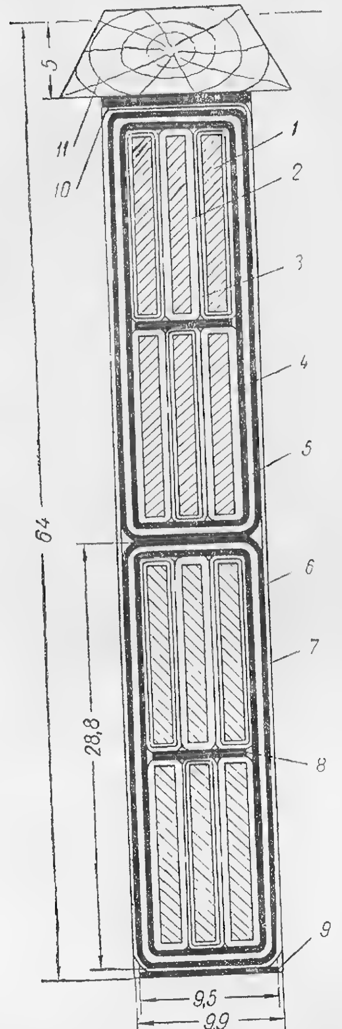



Рис. 183. Паз якоря электродвигателя 4560 *квт*, 865 *в*:

*1* — проводник (медь голая 1,81 × × 12,5*мм*); *2* — изоляция проводника (микалента ЛФ4-1,01 *мм*); *3* — изоляция проводника; (стеклолента пропитанная, 0,1 *мм*); *4* — изоляция скрепляющая (бумага телефонная, 0,05 *мм*); *5* — изоляция секции (микалента ЛФ4-1,01 *мм*); *6* — изоляция секции (стеклолента пропитанная, 0,1 *мм*); *7*—изоляция паза (электрокартон ВЭ,0,1 *мм*); *8* — прокладка (микобумага ГМО,0,2 *мм*); *9*—прокладка (электрокартон ЭВ, 0,2 *мм*); *10* — прокладка под клин (микроэлектрокартон, 0,5 *мм*); *11* — клин.

2. Действительные размеры паза. Изоляцию паза берем по приложению IV (см. также рис. 183). Размеры паза «в свету»:

ширина паза $b_п = bu + \Delta b = 1{,}81 \cdot 3 + 4{,}4 = 9{,}83$ *мм*;

высота паза $h_п = hu + \Delta h + h_к = 12{,}5 \cdot 4 + 9{,}1 + 5 = 64{,}1$ *мм*.

Округляя, получим

$$b_п \times h_п = 9{,}9 \times 64 \text{ мм}.$$

Размеры паза в штампе

$$b'_п \times h_п = (b_п \times \Delta_ш) \times h_п = (9{,}9 + 0{,}56) \times 64 = 10{,}46 \times 64,$$

где $\Delta_ш$ — допуск на штамп, равный 0,56 *мм*.

3. Проверка выбранных размеров паза из условия максимально допустимой индукции в корне зубца.

Зубцовое деление по дну пазов

$$t_{z3} = \frac{\pi (D - 2h_п)}{Z} = \frac{\pi (250 - 2 \cdot 6{,}4)}{318} = 2{,}34 \text{ см}.$$

Ширина зубца в корне

$$b_{z3} = t_{z3} - b'_п = 2{,}34 - 1{,}046 = 1{,}294 \text{ см}.$$

Сечение зубцов на полюс по дну пазов

$$Q_{z3} = \frac{Z}{2p} \alpha_i b_{z3} l_{Fe} = 26{,}5 \cdot 0{,}765 \cdot 1{,}294 \cdot 117 = 3070 \text{ см}^2.$$

Индукция в корне зубца

$$B_{z3} = \frac{\Phi}{Q_{z3}} = \frac{73{,}8 \cdot 10^6}{3070} = 24\,100 \text{ гс}.$$

Полученная величина $B_{z3}$, учитывая низкую частоту перемагничивания, допустима.

## VIII. Расчет обмотки якоря

1. Средняя длина витка обмотки якоря

$$l_{wa} = 2(l + 1{,}4\tau) = 2(145 + 1{,}4 \cdot 65{,}5) = \mathbf{473{,}5} \textbf{ см};$$

$$l_л = 1{,}4\tau = 1{,}4 \cdot 65{,}5 = \mathbf{91{,}8} \textbf{ см}.$$

2. Полная длина меди обмотки якоря

$$L_{wa} = \frac{1}{2} l_{wa} N = \frac{1}{2} 4{,}735 \cdot 3816 = \mathbf{9020} \textbf{ м}.$$

3. Сопротивление обмотки якоря:
при 20° С

$$r_{a20} = \frac{L_{wa}}{57\,(2a)^2\, q_{Cu}} = \frac{9020}{57 \cdot (48)^2 \cdot 22{,}4} = 0{,}0031 \text{ ом}$$

при 75° С

$$r_{a75} = 1{,}22 r_{a20} = 1{,}22 \cdot 0{,}0031 = \mathbf{0{,}00378} \textbf{ ом}.$$



4. Основные потери в якоре

$$p_{Cu\,a} = I^2 r_{a75} = 5730^2 \cdot 0{,}00378 = 125 \cdot 10^3 \text{ вт}.$$

5. Потери на 1 *см*² поверхности

$$\frac{p_{Cu\,a}}{\pi D l} = \frac{125 \cdot 10^3}{\pi 250 \cdot 145} \approx 1{,}1 \text{ вт/см}^2 < 1{,}2 \text{ вт/см}^2.$$

6. Вес меди обмотки якоря

$$G_{Cu\,a} = L_{wa} q_a 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 9020 \cdot 22{,}4 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 1800 \text{ кг}.$$

7. Расчет шагов равносекционной обмотки якоря:
а) петлевая обмотка:
шаг по коллектору

$$y_к = \underset{(-)}{+} m = 2;$$

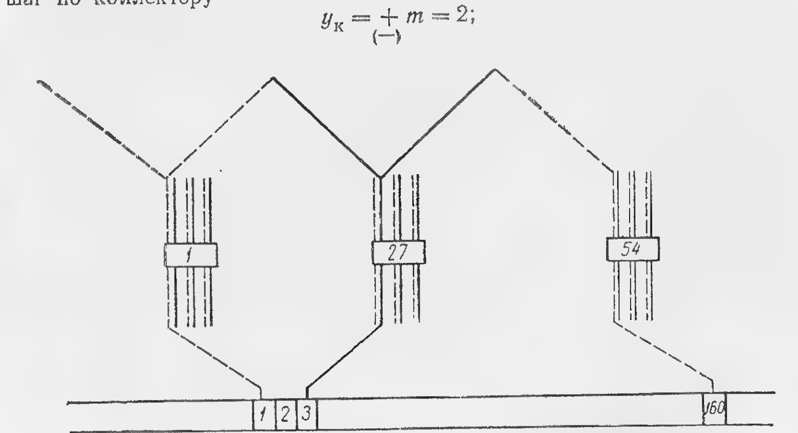



Рис. 184. Схема разрезной лягушечьей обмотки.

первый и второй частичные шаги

$$y_1 = \frac{Z}{2p} u \pm \varepsilon = 26{,}5 \cdot 3 - 1{,}5 = 78; \quad y_2 = y_1 - y_к = 78 - 2 = 76;$$

шаг по пазам

$$y_п = \frac{y_1}{u} = \frac{78}{3} = 26;$$

б) волновая обмотка:
шаг по коллектору

$$y'_к = \frac{K \overset{-}{(+)} a}{p} = \frac{954 - 12}{6} = 157.$$

(Взят знак «—», т. к. обмотка неперекрещенная.)

Первый и второй частичные шаги

$$y'_1 = y_1 + u = 78 + 3 = 81;$$

$$y'_2 = y_2 = y'_к - y'_1 = 157 - 81 = 76.$$

Шаг по пазам

$$y'_п = \frac{y'_1}{u} = \frac{81}{3} = 27.$$

Проверка выполнимости необходимых условий:

$$\frac{K}{p} = \frac{954}{6} = 159;$$

$$y_1 + y'_1 = 78 + 81 = 159 = \frac{K}{p}.$$

На рис. 184 представлена схема обмотки якоря.

## IX. Расчет компенсационной обмотки (§ 10-9)

1. М. д. с. якоря на полюсной дуге

$$F_{ap} = \frac{b_p}{2} A' = \frac{48{,}5}{2} \cdot 580 = \mathbf{14050}\ a.$$

2. Число витков компенсационной обмотки на полюс

$$\frac{w_c}{a_c} = \frac{F_{ap}}{I} = \frac{14\,050}{5730} = 2{,}45.$$

В связи с тем, что по условиям охлаждения и равномерного распределения м. д. с. компенсационной обмотки по полюсному наконечнику ток в одном стержне не должен превышать 3000 $a$, а также вследствие конструктивной трудности выполнения дробного числа витков на полюсе, принимаем две параллельных ветки компенсационной обмотки, т. е. $a_c = 2$ и, следовательно, $w_c = \mathbf{5}$.

3. М. д. с. компенсационной обмотки на полюс

$$F_c = w_c \frac{I}{a_c} = 5 \frac{5730}{2} = \mathbf{14\,320}\ a.$$

4. Степень компенсации

$$\gamma = \frac{F_c}{F_{ap}} 100 = \frac{14\,320}{14\,050} = 102\%.$$

Величина $\gamma$ должна находиться в пределах 85÷115%.

5. Число пазов компенсационной обмотки на полюсной дуге

$$Z_c = 2w_c = 2 \cdot 5 = \mathbf{10}.$$

6. Сечение, профиль меди и размеры пазов. Стержни компенсационной обмотки принимаем прямоугольного сечения, для которых плотность тока в нашем случае может быть 3,5 ÷ 4,6 $a/мм^2$.

Принимая верхний предел плотности тока для улучшения заполнения зубцовой зоны полюсного наконечника и возможности выполнения болтового соединения в местах разъема, получим предварительно сечение меди

$$q_c = \frac{I}{a_c s_c} = \frac{5730}{2 \cdot 4{,}6} = 622\ мм^2.$$

Двухсторонняя толщина изоляции стержней компенсационной обмотки от 1000 $в$ включительно с учетом допусков на укладку равна: по ширине $\Delta b_c = 2{,}8$ $мм$, по высоте $\Delta h_c = 3$ $мм$ (см. приложение IV). Поэтому размеры паза должны быть:

$$b'_{пс} = b_c + \Delta b_c + 0{,}4\,(b_c + 3{,}2)\ мм;$$
$$h_{пс} = h_c + \Delta h_c + 5 = (h_c + 8)\ мм,$$

где $b_c$ и $h_c$ — размеры стержня, $мм$;

0,4 — допуск на штамп;

5 $мм$ — высота шлица.

С другой стороны ширина паза определяется допустимой максимальной индукцией в зубцах компенсационной обмотки, которая не должна превосходить 19 000 $гс$.

Ширина полюсного наконечника по диаметру шлицев

$$b'_p = \left[1 + \frac{2\,(\delta + 0{,}5)}{D}\right] b_p = \left[1 + \frac{2\,(0{,}8 + 0{,}5)}{250}\right] 48{,}5 = 48{,}8\ см.$$

Максимальная ширина паза

$$b_{п\,c\,max} = \frac{b'_p - \dfrac{1{,}105\Phi}{l_p B_{p\,max}}}{Z_c} = \frac{48{,}8 - \dfrac{1{,}105 \cdot 73{,}8 \cdot 10^6}{144 \cdot 19\,000}}{10} = 1{,}91\ см.$$



Ширина меди

$$b_{c\,max} = b'_{п\,c\,max} - 3{,}2 = 19{,}1 - 3{,}2 = 15{,}9\ мм.$$

Выбираем стандартную медь с размерами

$$b_c \times h_c = \mathbf{12{,}5 \times 50 = 624{,}1}\ мм^2.$$

Размеры паза:

а) «в свету»

$$b_{п\,c} = 12{,}5 + 2{,}8 = \mathbf{15{,}3}\ мм;\quad h_{п\,c} = 50 + 3 + 5 = \mathbf{58}\ мм;$$

б) в штампе

$$b'_{п\,c} = b_{п\,c} + 0{,}4 = 15{,}3 + 0{,}4 = \mathbf{15{,}7}\ мм;\quad h'_{п\,c} = h_{п\,c} = \mathbf{58}\ мм.$$

7. Плотность тока

$$s_c = \frac{I}{a_c q_c} = \frac{5730}{2 \cdot 624{,}1} = \mathbf{4{,}6}\ а/мм^2.$$

8. Сечение и профиль меди соединительных дуг компенсационной обмотки. Для создания достаточной контактной поверхности в месте соединения дуг и стержней, а также для увеличения поверхности охлаждения принимаем по ГОСТ 434—41 дуги из двух параллельных прямоугольных медных шин

$$2\,(b_{сд} \times h_{сд}) = 2\,(4 \times 80) = 2 \cdot 319 = 638\ мм^2.$$

9. Длина:

стержня

$$l_c = [l_p + 2h_{сд} + 2\,(12 \div 15)] = [144 + 2 \cdot 8 + 2 \cdot 15] = 190\ см;$$

всех стержней

$$L_c = 4pw_c l_c = 4 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 1{,}9 = 228\ м.$$

10. Сопротивление стержней:

при 20° C

$$r'_{c\,20} = \frac{L_c}{57 a_c^2 q_c} = \frac{228}{57 \cdot 2^2 \cdot 624{,}1} = 0{,}0016\ ом;$$

при 75° C

$$r'_{c\,75} = 1{,}22 r'_{c\,20} = 1{,}22 \cdot 0{,}0016 = 0{,}00195\ ом.$$

11. Средняя длина соединительной дуги

$$l_{с.\,д} = 1{,}2\tau = 1{,}2 \cdot 65{,}5 = 78{,}5\ см.$$

12. Длина всех дуг и их вес

$$L_{с.\,д} = 4pw_c l_{с.\,д} = 4 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 0{,}785 = 94{,}2\ м;$$
$$G_{Cu\,с.\,д} = L_{с.\,д} \cdot q_{с.\,д} \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 94{,}2 \cdot 638 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 535\ кг.$$

13. Сопротивление дуг:

при 20° C

$$r_{с.\,д\,20} = \frac{L_{с.\,д}}{57 a_c^2 q_{с.\,д}} = \frac{94{,}2}{57 \cdot 2^2 \cdot 638} = 0{,}00065\ ом;$$

при 75° C

$$r_{с.\,д75} = 1{,}22 r_{с.\,д20} = 1{,}22 \cdot 0{,}00065 = 0{,}000793\ ом.$$

14. Сопротивление и потери компенсационной обмотки при 75° C

$$r'_{c\,75} + r_{с.\,д75} = 0{,}00195 + 0{,}00079 = 0{,}00274\ ом;$$
$$p_c = I^2 r_{c75} = 5730^2 \cdot 0{,}00274 = 90{,}5 \cdot 10^3\ вт.$$

15. Вес стержней

$$G'_{\text{Cu c}} = L_c q_c 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 228 \cdot 624{,}1 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 1265 \text{ кг}.$$

16. Полный вес

$$G_{\text{Cu c}} = G'_{\text{Cu c}} + G_{\text{Cu с.д}} = 1265 + 535 = 1800 \text{ кг } (0{,}394 \text{ кг/квт}).$$

## X. Обмотка добавочных полюсов (§ 10-8)

1. М. д. с. якоря на полюс

$$F_a = \frac{\tau}{2} A = \frac{65{,}5}{2}\, 580 = 18\,900 \text{ а}.$$

2. Число витков добавочных полюсов. Задаемся величиной зазора под добавочным полюсом $\delta_к$. Для крупных машин с кратковременной толчкообразной нагрузкой до 2,5-кратного значения выбирают зазор до 4-кратного значения от главного воздушного зазора. В нашем случае $\delta_к = 4 \cdot 0{,}8 = 3{,}2$ *см*. Принимаем $\delta_к = 3{,}5$ *см*.

Удельная проводимость рассеяния паза по § 10-8

$$\zeta \approx \left[c_п \frac{h_п}{b_п} + \frac{\tau}{l_1} + \frac{0{,}25 \cdot 10^6}{A l_1 w_s v \frac{p}{a}}\right] 10^{-8} =$$

$$= \left[0{,}3 \frac{6{,}4}{1{,}046} + \frac{65{,}5}{126} + \frac{0{,}25 \cdot 10^6}{580 \cdot 126 \cdot 1 \cdot 9{,}15 \cdot 0{,}5}\right] 10^{-8} = 3{,}11 \cdot 10^{-8},$$

где для многоходовых обмоток $c_п \approx 0{,}3$, для одноходовых $c_п \approx 0{,}6$.

М. д. с. добавочного полюса

$$F_к = \frac{1}{\mu_0} A \zeta \delta_к 10^8 + F_a - F_c =$$

$$= \frac{1}{0{,}4\pi} \cdot 580 \cdot 3{,}11 \cdot 3{,}5 + 18\,900 - 14\,320 = 9580 \text{ а}.$$

Число витков

$$w_к = \frac{F_к a_к}{I} = \frac{9580 \cdot 2}{5730} = 3{,}34,$$

где $a_к$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов, принятое равным $a_c$. Принимаем $w_к = 3$. Окончательно

$$F_к = w_к \frac{I}{a_к} = 3 \frac{5730}{2} = 8600 \text{ а}.$$

3. Отношение м. д. с. $F_c + F_к$ к м. д. с. $F_a$

$$\vartheta = \frac{F_c + F_к}{F_a} = \frac{14\,320 + 8600}{18\,900} = 1{,}21.$$

4. Зазор под добавочным полюсом при $\zeta = 3{,}11 \cdot 10^{-8}$

$$\delta_к = \frac{(\vartheta - 1) D \cdot 10^{-8}}{\zeta p} = \frac{(1{,}21 - 1) \cdot 250}{3{,}11 \cdot 6} = 2{,}82 \text{ см}.$$

Так как необходимо предусмотреть регулирование посредством немагнитных или магнитных прокладок у ярма при настройке коммутации, принимаем $\delta_к = 3{,}5$ *см*.

5. Сечение и профиль меди обмотки добавочных полюсов. Плотность тока в обмотке добавочных полюсов компенсированных машин обычно лежит в пределах $3{,}3 \div 3{,}9$ *а/мм²*. Учитывая хорошие условия охлаждения, а также необходимость получения достаточного междуполюсного пространства для выполнения надежного крепления обмотки вспомогательных полюсов, принимаем верхний предел плотности тока $s_к = 3{,}9$ *а/мм²*.



Предварительное сечение меди обмотки

$$q_к = \frac{I}{a_к s_к} = \frac{5730}{2 \cdot 3{,}9} = 734 \text{ мм}^2.$$

Профиль меди обмотки добавочных полюсов устанавливается при помощи масштабного эскиза междуполюсного окна (рис. 185). При этом необходимо установить ширину добавочных полюсов, которые в крупных компенсированных машинах, предназначенных для работы с большими перегрузками по току, лежат в пределах $6{,}5 \div 10$ *см*. В дальнейшем ширина добавочного полюса проверяется по величине индукции в сердечнике полюса при перегрузках, которая не должна превосходить 14 000 — 16 000 *гс*.

Устанавливаем по эскизу предварительную ширину добавочного полюса 9,5 *см* и профиль меди с размерами $b_{Cu} \times h_{Cu} = 12{,}5 \times 60 = 749{,}1$ *мм²*.

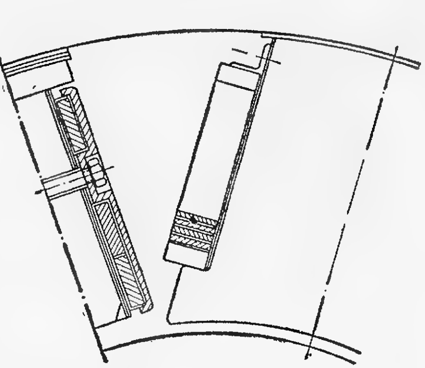


Рис. 185. Эскиз главного и добавочного полюсов.

6. Плотность тока

$$s_к = \frac{I}{a_к q_к} = \frac{5730}{2 \cdot 749{,}1} = 3{,}75 \text{ а/мм}^2.$$

7. Средняя длина витка обмотки добавочных полюсов

$$l_{к.ср} = 2 l_{mк} + \pi (b_{mк} + b_{Cu} + 1) =$$
$$= 2 \cdot 145 + \pi (9{,}5 + 1{,}25 + 1) = 327 \text{ см}.$$

Здесь $l_{mк}$ — длина добавочного полюса, равная конструктивной длине якоря;

$b_{mк}$ — ширина сердечника добавочного полюса.

8. Длина и вес всей меди добавочных полюсов

$$L_к = 2 p w_к l_{к.ср} = 12 \cdot 3 \cdot 3{,}27 = 118 \text{ м};$$

$$G_{Cuк} = L_к q_к \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 118 \cdot 734 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 784 \text{ кг}.$$

9. Сопротивление:

при 20° С

$$r_{к20} = \frac{L_к}{57 a_к^2 q_к} = \frac{118}{57 \cdot 2^2 \cdot 749{,}1} = 0{,}000693 \text{ ом};$$

при 75° С

$$r_{к75} = 1{,}22 r_{к20} = 1{,}22 \cdot 0{,}000693 = 0{,}000845 \text{ ом};$$

10. Потери в добавочных полюсах

$$p_к = I^2 r_{к75} = 5730^2 \cdot 0{,}000845 = 27{,}7 \cdot 10^3 \text{ вт}.$$

## XI. Размеры магнитопровода (§ 10-6)

1. Предварительная высота ярма якоря

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 l_{Fe} B_{j1}} = \frac{73{,}8 \cdot 10^6}{2 \cdot 117 \cdot 15\,500} = 20{,}4 \text{ см},$$

где $B_{j1}$ — индукция в спинке якоря; при частотах до 15 *гц* допустимая индукция в спинке якоря находится в пределах $14\,000 \div 15\,500$ *гс*. Для получения возможно меньшего веса якоря, который также определяет маховой момент двигателя, принимаем значение $B_{j1} = 15\,500$ *гс*.

2. Внутренний диаметр якоря

$$D_{j1} = D - 2(h_{j1} + h_{п}) = 250 - 2(20,4 + 6,4) = 196,4 \text{ см.}$$

Принимаем $D_{j1} = 196$ **см.**

3. Высота спинки якоря

$$h_j = \frac{D - (D_{j1} + 2h_{п})}{2} = \frac{250 - (196 + 2 \cdot 6,4)}{2} = \mathbf{20,6} \text{ см.}$$

4. Конструктивная длина сердечника и длина чистого железа главного полюса

$$l_m = l - 1 = 145 - 1 = \mathbf{144} \text{ см;}$$

$$l_{mFe} = l_m k_{п1} = 144 \cdot 0,95 = \mathbf{137} \text{ см,}$$

где $k_{п1}$ — коэффициент заполнения железа полюса, который при толщине листа 1 *мм* равен 0,95.

5. Ширина сердечника главного полюса

$$b_m = \frac{\sigma \Phi}{l_{mFe} B_m},$$

где $\sigma$ — коэффициент рассеяния:

$$\sigma \approx 1 + (10 \div 15)\frac{\delta}{\tau};$$

$B_m$ — индукция в сердечнике главного полюса; обычно $B_m = 13\,500 \div 15\,500$ *гс*.

Принимая $B_m = 15\,500$ *гс*, $\sigma = 1,2$, получим

$$b_m = \frac{1,2 \cdot 73,8 \cdot 10^6}{137 \cdot 15\,500} \approx 42 \text{ см.}$$

6. Внутренний диаметр ярма $D_{j2}$. Он зависит от высоты полюса, которая определяется не только размерами обмотки возбуждения, но также и конструктивными требованиями (крепление обмотки возбуждения, размещение дуг компенсационной обмотки и т. д.). Поэтому внутренний диаметр ярма в электромагнитном расчете принимается приближенно и уточняется при конструктивной разработке.

Обычно общая высота полюса находится в пределах $(0,4 \div 0,5)\tau$. Принимая предварительно общую высоту полюса $h'_m = 33$ *см*, получим

$$D_{j2} = D + 2h''_m + 2\delta = 250 + 2 \cdot 33 + 2 \cdot 0,8 = 317,6 \text{ см.}$$

Принимаем $D_{j2} = 318$ **см.**

7. Общая высота главного полюса

$$h'_m = \frac{D_{j2} - (D + 2\delta)}{2} = \frac{318 - (250 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-1})}{2} = \mathbf{33,2} \text{ см.}$$

8. Высота сердечника главного полюса

$$h_m = h'_m - h_{пс} = 33,2 - 5,8 = \mathbf{27,4} \text{ см.}$$

Примечания: 1. Обычно высота штампованного полюса бывает несколько меньше (на $2 \div 4$ *мм*) расчетной высоты для возможности установления регулировочных прокладок.

2. Высота полюсного наконечника $h'_p = 8$ *см*.

9. Длина ярма. В крупных компенсированных машинах длина ярма обычно больше длины якоря на $20 \div 50$ *см*. В нашем случае, исходя из условий работы привода, необходимо иметь возможно меньшую величину наружного диаметра,



а следовательно, целесообразно принять крайний предел разницы в длинах, т. е. принимаем предварительно

$$l_{j2} = l + 50 = 145,0 + 50 = \mathbf{195} \text{ см.}$$

10. Наружный диаметр станины. Величина индукции в станине $B_j$ обычно лежит в пределах $12\,000 - 13\,000$ *гс*. Учитывая, что станина будет литая с большим сечением, а следовательно, в ее сечении возможно наличие довольно больших раковин, принимаем значение индукции $B_{j2} = 12\,500$ *гс*. Тогда высота ярма и наружный диаметр станины

$$h_{j2} = \frac{\sigma \Phi}{2 l_{j2} B_{j2}} = \frac{1,2 \cdot 73,8 \cdot 10^6}{2 \cdot 195 \cdot 12\,500} = 18,6 \text{ см;}$$

$$D'_{j2} = D_{j2} + 2h_{j2} = 318 + 2 \cdot 18,6 = 355,2 \text{ см.}$$

Принимаем $D'_{j2} = 355$ **см.**

11. Высота ярма

$$h_{j2} = \frac{D'_{j2} - D_{j2}}{2} = \frac{355 - 318}{2} = \mathbf{18,5} \text{ см.}$$

## XII. Расчетные сечения магнитопровода и длины участков

1. Сечение воздушного зазора

$$Q_\delta = b_i l_i = 50,1 \cdot 141,2 = 7070 \text{ см}^2.$$

2. Сечение спинки якоря

$$Q_{j1} = h_{j1} l_{Fe} = 20,6 \cdot 117 = 2410 \text{ см}^2.$$

3. Зубцовое деление якоря на высоте $\frac{1}{2}h_{п}$

$$t_{z2} = \frac{\pi (D - h_{п})}{Z} = \frac{\pi (250 - 6,4)}{318} = \mathbf{2,4} \text{ см.}$$

4. Ширина зубца:

а) по окружности якоря

$$b_{z11} = t_{z1} - b'_{п} = 2,47 - 1,046 = 1,424 \text{ см;}$$

б) на высоте $\frac{1}{2}h_{п}$

$$b_{z12} = t_{z2} - b'_{п} = 2,4 - 1,046 = 1,354 \text{ см;}$$

в) по дну пазов

$$b_{z13} = t_{z3} - b'_{п} = 2,34 - 1,046 = 1,294 \text{ см.}$$

5. Сечение сердечника полюса

$$Q_m = b_m l_{mFe} = 42 \cdot 137 = 5750 \text{ см}^2.$$

6. Расчетная ширина наконечника главного полюса

$$b_{p1/3} = \frac{D + 2\left(\delta + \frac{1}{3}h_{пс}\right)}{D + 2\delta} b_p = \frac{250 + 2\left(0,8 + \frac{1}{3}5,8\right)}{250 + 2 \cdot 0,8} 48,5 = 49,4 \text{ см.}$$

7. Расчетное сечение зубцов компенсационной обмотки

$$Q_{pz1/3} = l_{mFe}(b_{p1/3} - Zb'_{пс}) = 137(49,4 - 10 \cdot 1,57) = 4610 \text{ см}^2.$$

8. Сечение ярма

$$Q_{j2} = h_{j2} l_{j2} = 18,5 \cdot 195 = 3600 \text{ см}^2.$$

9. Длина магнитопровода: в воздушном зазоре и в зубцах якоря

$$L_\delta = \delta = 0{,}8\ см \text{ и } L_z = h_п = 6{,}4\ см;$$

в спинке якоря и в ярме статора

$$L_{j1} = \frac{\pi (D + D_{j1} - 2h_п)}{4 \cdot 2p} + \frac{h_{j1}}{2} = \frac{\pi (250 + 196 - 2 \cdot 6{,}4)}{4 \cdot 12} + \frac{20{,}6}{2} = 38{,}3\ см;$$

$$L_{j2} = \frac{\pi (D_{f2} + h_{j2})}{2 \cdot 2p} = \frac{\pi (318 + 18{,}5)}{2 \cdot 12} = 44\ см;$$

в зубцах полюсного наконечника и в сердечнике полюса

$$L_{pz} = h_{пс} = 5{,}8\ см;$$

$$L_m = h_m = 27{,}4\ см.$$

## XIII. Индукции в расчетных сечениях магнитопровода и определение м. д. с.

1. Э. д. с. двигателя при номинальной нагрузке

$$E = U - \Delta U = 865 - 44{,}2 = 820{,}8\ в,$$

где

$$\Delta U = I (r_{a75} + r_{c75} + r_{к75}) + \Delta U_щ = 5730 (0{,}00378 + 0{,}002748 + 0{,}000845) + 2 = 42{,}2 + 2 = 44{,}2\ в;$$

$\Delta U_щ$ — падение напряжения в контакте щеток, обычно принимаемое 2 *в*.

2. Номинальный магнитный поток

$$\Phi = 0{,}738 \frac{820{,}8}{822} \approx 0{,}738\ вб\ (0{,}738 \cdot 10^8\ мкс).$$

3. Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{Q_\delta} = \frac{0{,}738 \cdot 10^8}{7070} = 10\,420\ гс\ (1{,}042\ вб/м^2).$$

4. Условные индукции в расчетных сечениях зубцов:

$$B'_{z1} = B_\delta k_{z1} \frac{t_{z1}}{b'_п} = 1{,}042 \cdot 0{,}885 \frac{2{,}47}{1{,}046} = 2{,}18\ вб/м^2;$$

$$B'_{z2} = B_\delta k_{z2} \frac{t_{z1}}{b'_п} = 1{,}042 \cdot 0{,}93 \frac{2{,}47}{1{,}046} = 2{,}3\ вб/м^2;$$

$$B'_{z3} = B_\delta k_{z3} \frac{t_{z1}}{b'_п} = 1{,}042 \cdot 0{,}975 \frac{2{,}47}{1{,}046} = 2{,}405\ вб/м^2,$$

где

$$k_{z1} = \frac{b'_п}{b_{z11}} \frac{l_i}{l_{Fe}} = \frac{1{,}046}{1{,}424} \cdot \frac{141{,}2}{117} = 0{,}885;$$

$$k_{z2} = \frac{b'_п}{b_{z12}} \frac{l_i}{l_{Fe}} = \frac{1{,}046}{1{,}354} \cdot \frac{141{,}2}{117} = 0{,}93;$$

$$k_{z3} = \frac{b'_п}{b_{z13}} \frac{l_i}{l_{Fe}} = \frac{1{,}046}{1{,}294} \cdot \frac{141{,}2}{117} = 0{,}975.$$

5. Индукции:

в спинке якоря

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2Q_{j1}} = \frac{0{,}738 \cdot 10^8}{2 \cdot 2410} = 15\,320\ гс\ (1{,}532\ вб/м^2);$$

в полюсном сердечнике (при $\sigma = \text{const}$)

$$B_m = \frac{\sigma\Phi}{Q_m} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}738 \cdot 10^8}{5750} = 15\,400\ гс\ (1{,}54\ вб/м^2);$$



в расчетном сечении зубцов полюсного наконечника

$$B_{pz} = \frac{1{,}05\Phi}{Q_{pz^1/_3}} = \frac{1{,}05 \cdot 0{,}738 \cdot 10^8}{4610} = 16\,800\ гс\ (1{,}68\ вб/м^2);$$

в ярме

$$B_{j2} = \frac{\sigma\Phi}{2Q_{j2}} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}738 \cdot 10^8}{2 \cdot 3600} = 12\,300\ гс\ (1{,}23\ вб/м^2).$$

6. М. д. с. на отдельных участках и на всю цепь магнитопровода (на 1 полюс):

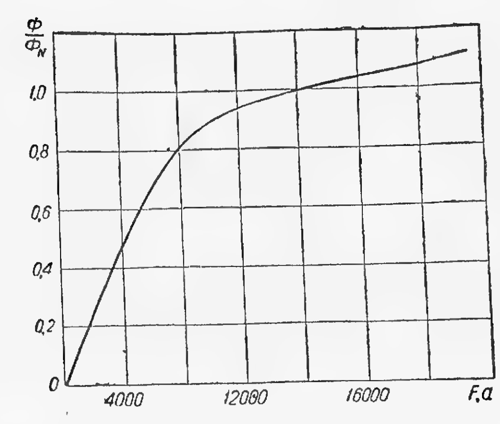



Рис. 186. Характеристика намагничивания электродвигателя 4560 *квт*, 865 *в*.

а) на воздушный зазор

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} k_C L_\delta B_\delta = \frac{1}{0{,}4\pi} 1{,}1 \cdot 10\,420 \cdot 0{,}8 = 7350 a,$$

где $k_C$ — коэффициент Картера:

$$k_C = \frac{t_{z1} + 10\delta}{b_{z11} + 10\delta} = \frac{2{,}47 + 8}{1{,}424 + 8} = 1{,}1;$$

б) зубцов якоря

$$F_z = H_z L_z = 957 \cdot 6{,}4 = 6120\ a,$$

где $H_z$ — средняя напряженность поля в зубцах:

$$H_z = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6} = \frac{600 + 4 \cdot 960 + 1300}{6} = 957\ а/см.$$

Значения $H_{z1}$, $H_{z2}$ и $H_{z3}$ определяются по кривым намагничивания невысоколегированной электротехнической стали Э12 (см. приложение II) с учетом зубцовых коэффициентов $k_{z1}$, $k_{z2}$ и $k_{z3}$ для каждого сечения;

в) спинки якоря

$$F_{j1} = H_{j1} L_{j1} = 24 \cdot 38{,}3 = 920\ a.$$

Значение $H_{j1}$ определяется по кривой намагничивания стали Э12;

г) зубцов полюсного сердечника

$$F_{pz} = H_{pz} L_{pz} = 60 \cdot 5{,}8 = 348\ a.$$

Значение $H_{pz}$ определяется по кривой намагничивания листового железа. При индукциях, превышающих 16 000 *гс*, без большой погрешности можно пользоваться кривой намагничивания электротехнической стали;

д) полюсного сердечника

$$F_m = H_m L_m = 32 \cdot 27{,}4 = 876\ a;$$

е) ярма

$$F_{j2} = H_{j2} L_{j2} = 14 \cdot 44 = 116\ a;$$

ж) суммарная м. д. с. на один полюс

$$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_{j1} + F_{pz} + F_m + F_{j2} = 7350 + 6120 + 920 + 348 + 876 + 616 = 16\,230\ a.$$

Произведя аналогичным образом расчет для значений потока 0,5 $\Phi_N$; 0,8$\Phi_N$; 1,1$\Phi_N$, данные сводим в табл. 58. По данным строим характеристику намагничивания (рис. 186).

*Таблица 58*

**Данные для построения характеристики намагничивания двигателя** 4560 *квт*, 865 *в*

| $\frac{\Phi}{\Phi_N}$ | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,1 |
|---|---|---|---|---|
| $\Phi$, *вб* | 0,369 | 0,590 | 0,738 | 0,812 |
| $B_\delta$, *гс* | 5210 | 8350 | 10 420 | 11 470 |
| $B_{z1,2,3}$, *гс* | 11 500 | 17 450 | 21 800 | 24 000 |
| | | 18 400 | 23 000 | 25 300 |
| | | 19 250 | 24 050 | 26 400 |
| $B_{j1}$, *гс* | 7660 | 12 250 | 15 320 | 16 850 |
| $B_{pz}$, *гс* | 8400 | 13 450 | 16 800 | 18 480 |
| $B_m$, *гс* | 7700 | 12 420 | 15 400 | 16 920 |
| $B_{j2}$, *гс* | 6150 | 9840 | 12 300 | 13 520 |
| $H_{z1,2,3}$, *а/см* | 5,6 | 90 | 600 | 1370 |
| | | 140 | 960 | 1800 |
| | | 190 | 1300 | 2150 |
| $H_z$, *а/см* | 5,6 | 140 | 957 | 1788 |
| $H_{j1}$, *а/см* | 2,3 | 6,8 | 24 | 60 |
| $H_{pz}$, *а/см* | 4,5 | 13,0 | 60 | 140 |
| $H_m$, *а/см* | 4,0 | 9,6 | 32 | 62 |
| $H_{j2}$, *а/см* | 5,4 | 9,5 | 14 | 18,8 |
| $F_\delta$, *а/см* | 3675 | 5880 | 7350 | 8080 |
| $F_z$, *а* | 36 | 895 | 6120 | 11 420 |
| $F_{j1}$, *а* | 88 | 260 | 920 | 2300 |
| $F_{pz}$, *а* | 26 | 75 | 348 | 812 |
| $F_m$, *а* | 104 | 263 | 876 | 1700 |
| $F_{j2}$, *а* | 240 | 418 | 616 | 826 |
| $\Sigma F$, *а* | 4169 | 7791 | 16 230 | 25 118 |



## XIV Расчет обмотки возбуждения (§ 10-7)

1. Средняя длина обмотки возбуждения (предварительно)

$$l_{wf} = [2(b_m + l_m) + \pi(b_{кf} + R_{кf}) + 1]\ см,$$

где $b_{кf}$ — толщина катушки;

$R_{кf}$ — радиус закругления катушки.

Принимая предварительно $b_{кf} = 5$ *см* и $R_{кf} = 2$ *см*, найдем

$$l_{wf} = [2(144 + 42) + \pi(5 + 2) + 1] = 395\ см.$$

2. Сечение и профиль меди. Сечение

$$q_f = \frac{1{,}1 \cdot 2p\Sigma F l_{wf} \rho_{75}}{U_f} = \frac{1{,}1 \cdot 12 \cdot 16\,230 \cdot 3{,}95}{46{,}7 \cdot 110} = 165\ мм^2.$$

Здесь 1,1 — коэффициент запаса.

Так как $q_f > 40$—45 *мм*², то применяем однослойную обмотку из полосовой меди с междувитковой изоляцией из асбестовой бумаги толщиной 0,4 *мм*.

Устанавливая по эскизу междуполюсного окна возможную ширину меди, принимаем по ГОСТ 434—41 $b_f \times h_f = 40 \times 4{,}1$ (159,1 *мм*²).

3. Число витков. При определении числа витков должны исходить из величины допустимой плотности тока $s_f$, которая в нашем случае, учитывая хорошее охлаждение, может быть около 2,5 *а/мм*², т. е.

$$w_f = \frac{\Sigma F}{q_f s_f} = \frac{16\,230}{159{,}1 \cdot 2{,}5} = 40{,}8.$$

Принимаем 41 виток.

Возможность размещения витков на полюсе проверяем по эскизу междуполюсного окна (см. рис. 185).

4. Ток возбуждения и его плотность при номинальной нагрузке

$$i_{fN} = \frac{\Sigma F}{w_f} = \frac{16\,230}{41} = 396\ a;$$

$$s_f = \frac{i_{fN}}{q_f} = \frac{396}{159{,}1} = 2{,}49\ а/мм^2.$$

5. Уточняем среднюю длину витка обмотки возбуждения

$$l_{wf} = [2(l_m + b_m) + \pi(b_f + r) + 1] = [2(144 + 42) + \pi(4 + 2) + 1] = 391{,}5\ см,$$

где $r$ — минимальный радиус закругления меди:

$$r = \frac{0{,}05 b_f^2}{h_f} = \frac{0{,}05 \cdot 40^2}{4{,}1} = 19{,}5\ мм.$$

Принимаем $r = 20$ *мм*. Окончательно величина $l_{wf}$ устанавливается по чертежу.

6. Длина и вес всей меди

$$L_f = 2pw_f l_{wf} = 12 \cdot 41 \cdot 3{,}915 = 1922\ м;$$

$$G_{Cuf} = L_f q_f \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 1922 \cdot 159{,}1 \cdot 8{,}9\ 10^{-3} = 2720\ кг.$$

7. Сопротивление:

при 20°С

$$r_{f20} = \frac{L_{f(м)}}{57\, q_{f(мм^2)}} = \frac{1922}{57 \cdot 159{,}1} = 0{,}2120\ м;$$

при 75°С

$$r_{f75} = 1{,}22\, r_{f20} = 1{,}22 \cdot 0{,}212 = \mathbf{0{,}259\ ом}.$$

8. Максимальный ток возбуждения

$$i_{f\max} = \frac{U_f}{r_{f75}} = \frac{110}{0{,}259} = 425 \ a.$$

9. Коэффициент запаса

$$k_{зап} = \frac{i_{f\max}}{i_{fN}} = \frac{425}{396} = 1{,}072.$$

## XV. Расчет коммутации и уточнение размеров коллектора (§10-8)

1. Линейная скорость коллектора:
а) при основной скорости вращения

$$v_{кN} = \frac{\pi D_к n_N}{60} = \frac{\pi 1{,}7 \cdot 70}{60} = 6{,}23 \ м/сек;$$

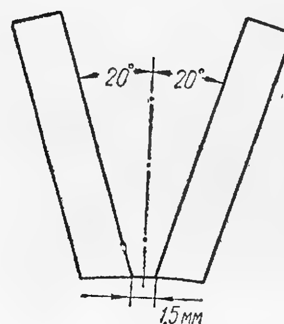



Рис. 187. Эскиз наклонных щеткодержателей.

б) при максимальной скорости вращения

$$v_{к\max} = \frac{\pi 1{,}7 \cdot 120}{60} = 10{,}68 \ м/сек.$$

2. Среднее напряжение между коллекторными пластинами

$$\varepsilon_{к.ср} = \frac{2pU}{K} = \frac{12 \cdot 865}{954} = 10{,}89 \ в.$$

3. Ширина щетки определяется допустимой шириной зоны коммутации $b_{к.з}$.

Во вновь проектируемых машинах целесообразно для избежания влияния главного поля в зоне коммутации иметь ширину зоны коммутации не более 50% междуполюсной зоны $c_p = \tau - b_p = 65{,}5 - 48{,}5 = 17$ *см*.

Следовательно, с одной стороны

$$b_{к.з} \approx 0{,}5 c_p,$$

а с другой стороны

$$b_{к.з} = \left[b_щ + \left(u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right) t_к\right] \frac{D}{D_к}.$$

Отсюда максимальная ширина щетки

$$b_{щ\max} = 0{,}5 c_p \frac{D_к}{D} - \left(u + \frac{a}{p} + \varepsilon\right) t_к =$$

$$= 0{,}5 \cdot 17 \frac{170}{250} - \left(3 + \frac{12}{6} + 1{,}5\right) 0{,}56 = 4{,}38 \ см.$$

Кроме того,

$$b_щ \geqslant (m+1)\,t_к \ \text{и} \ b_щ > (t+1)\,t_к \ (m = 2; \ t = 2).$$

Принимаем двойные наклонные щеткодержатели (рис. 187). Для возможности регулирования ширины зоны коммутации при настройке коммутации двигателя применяем щетки с шириной несколько меньше максимальной.

Выбираем двойные щетки марки ЭГ-4 с размерами каждой 1,6 × 3,2 *мм* и наклоном 20°. Ширина соприкосновения двойной щетки с коллектором с учетом наклона

$$b'_щ = \frac{2b_щ}{\cos 20°} = \frac{2 \cdot 1{,}6}{\cos 20°} = \mathbf{3{,}41} \ см.$$



Площадь двойной щетки $S'_щ$ с учетом наклона

$$S'_щ = b'_щ \cdot l_щ = 3{,}41 \cdot 3{,}2 = \mathbf{10{,}91} \ см^2.$$

4. Число щеток на один болт. Исходя из того, что плотность тока при перегрузке не должна превосходить 20 $а/см^2$, принимаем предварительно плотность тока при номинальной нагрузке $s_щ = 8 \ а/см^2$, а следовательно,

$$n_щ = \frac{2I}{2p s_щ s'_щ} = \frac{2 \cdot 5730}{2p \cdot 8 \cdot 10{,}91} = 10{,}92.$$

Принимаем $n_щ = 11$.

5. Активная длина коллектора

$$l_к = n_щ (l_щ + 0{,}8) = 11\,(3{,}2 + 0{,}8) = \mathbf{44} \ см.$$

6. Общая поверхность контакта всех щеток

$$S_щ = 2p\, n_щ S'_щ = 12 \cdot 11 \cdot 10{,}91 = 1445 \ см^2.$$

7. Плотность тока под щетками при номинальной нагрузке

$$s_щ = \frac{2I}{S_щ} = \frac{2 \cdot 5730}{1445} = \mathbf{7{,}93} \ а/см^2.$$

8. Поверхность охлаждения коллектора

$$S_к = \pi D_к l_к = \pi \cdot 170 \cdot 44 = 23\,500 \ см^2.$$

9. Потери в переходном контакте

$$p_{п.к} = \Delta U_щ I = 2 \cdot 5730 = 11{,}46 \cdot 10^3 \ вт.$$

10. Потери на трение щеток о коллектор:
а) при номинальной скорости вращения

$$p_{т.щ\,N} = 0{,}35\, S_щ U_{кN} = 0{,}35 \cdot 1445 \cdot 6{,}23 = 3{,}15 \cdot 10^3 \ вт;$$

б) при максимальной скорости вращения

$$p_{т.щ\max} = 0{,}35 \cdot 1445 \cdot 10{,}68 = 5{,}4 \cdot 10^3 \ вт.$$

11. Поверхность охлаждения, приходящаяся на 1 *вт* потерь:
а) при номинальной скорости вращения

$$\Delta S_{кN} = \frac{S_к}{p_{т.щN} + p_{п.к}} = \frac{23\,500}{3150 + 11\,460} = 1{,}62 \ см^2/вт;$$

б) при максимальной скорости вращения

$$\Delta S_{к\min} = \frac{S_к}{p_{т.щ\max} + p_{п.к}} = \frac{23\,500}{5400 + 11460} = 1{,}395 \ см^2/вт.$$

Полученные величины вполне допустимы при хороших условиях охлаждения (в нашем случае $\Delta S_к$ не должно быть меньше 0,9 — 1 $см^2/вт$).

12. Полная ширина щетки. Так как с ростом ширины зоны коммутации реактивная э. д. с. $e_p$ уменьшается и так как мы приняли ширину щетки меньше, чем можно было бы принять, то целесообразно применить раздвижку щеток. Принимаем раздвижку 1 *см*. Одновременно учитываем, что между внутренними гранями щеток щеткодержателя на коллекторе имеется зазор около 1,5 *мм* (см. рис. 187).

Тогда полная ширина щетки

$$b_{щ.п} = b'_щ + 1{,}0 + 0{,}15 = 3{,}41 + 1 + 0{,}15 = \mathbf{4{,}56} \ см.$$

13. Щеточное перекрытие

$$\beta = \frac{b_{щ.п}}{t_к} = \frac{4{,}56}{0{,}56} = 8{,}17.$$

14. Ширина коммутационной зоны

$$b_{\text{к.з}} = \left(\beta + u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right) t_{\text{к}} \frac{D}{D_{\text{к}}} =$$

$$= \left(8{,}17 + 3 - \frac{12}{6} + 1{,}5\right) 0{,}56 \frac{250}{170} = 8{,}8 \text{ см}.$$

15. Ширина наконечника добавочного полюса $b_{p\text{к}} \approx b_{\text{к.з}}$.

16. Отношение ширины зоны коммутации к междуполюсному промежутку

$$\frac{b_{\text{к.з}}}{c_p} 100 = \frac{8{,}8}{17} \cdot 100 = 51{,}2\%.$$

17. Расчет реактивной э. д. с. Реактивная э. д. с. при номинальной нагрузке и номинальной скорости вращения

$$e_{p70} = 2Av_{aN}w_s l_1 \zeta = 2 \cdot 580 \cdot 915 \cdot 1 \cdot 126 \cdot 3{,}06 \cdot 10^{-8} = 4{,}10 \text{ в}.$$

Здесь

$$\zeta = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}\left[(\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}}) \frac{2u'}{\beta} + \lambda_{\text{л}} \frac{l_{\text{л}}}{l_1}\right] =$$

$$= 1{,}26 \cdot 10^{-8}\left[(2{,}45 + 0{,}504) \cdot 0{,}7 + 0{,}5 \frac{91{,}8}{126}\right] = 3{,}06 \cdot 10^{-8},$$

где $\lambda_{\text{п}}$ — коэффициент магнитной проводимости открытого паза:

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1 + 3h_0}{3b'_{\text{п}}} = \frac{5{,}46 + 3 \cdot 0{,}74}{3 \cdot 1{,}046} = 2{,}45.$$

Значения $h_1$ и $h_0$ вычисляются по эскизу паза (рис. 183); $\lambda_{\text{к}}$ — коэффициент магнитной проводимости по коронкам зубцов:

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{b_{z_{11}}}{2\delta'_{\text{к}}} + 0{,}3 = \frac{1{,}424}{2 \cdot 3{,}5} + 0{,}3 = 0{,}504;$$

$$\lambda_{\text{л}} = 0{,}5; \quad \frac{2u'}{\beta} = f(u, \varepsilon, \beta) = 0{,}7 \text{ (табл. 53)}.$$

По формуле в другом виде

$$e_{p70} = \frac{4}{3} \frac{I}{a_1} \frac{D_{\text{к}}}{t_{\text{к}}} \frac{n_N}{100} w_s^2 l_1 \left[\frac{2u'}{\beta}(\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}}) + \lambda_{\text{л}} \frac{l_{\text{л}}}{l_1}\right] \cdot 10^{-8} =$$

$$= \frac{4}{3} \cdot \frac{5730}{12} \cdot \frac{170}{0{,}56} \cdot \frac{70}{100} \cdot 1^2 \cdot 126 \left[0{,}7(2{,}45 + 0{,}504) + 0{,}5 \frac{91{,}8}{126}\right] \cdot 10^{-8} = 4{,}15 \text{ в}.$$

$\left(\text{Для лягушечьей обмотки } a_1 = \frac{a}{2}\right)$. По [98] в формулы для $e_p$ вместо реального щеточного перекрытия $\beta$ вводится расчетное перекрытие $\beta_i = \beta + \left(1 - \frac{a}{p}\right)$. Однако получаемое при этом уточнение незначительно. Так в нашем примере вместо $e_p = 4{,}15$ *в* получаем $e_p = 4{,}2$ **в**.

Реактивная э. д. с. при номинальном токе и максимальной скорости вращения

$$e_{p120} = \frac{n_{max}}{n_N} e_{p70} = \frac{120}{70} \cdot 4{,}2 = 7{,}21 \text{ в}.$$

Величина реактивной э. д. с. при перегрузках:

а) $n = 70$ об/мин. Так как регулирование скорости вращения до 70 об/мин осуществляется изменением подводимого напряжения при постоянном потоке, то кратности перегрузки по моменту соответствуют кратностям перегрузки по току (изменением потока вследствие действия коммутационных токов якоря пренебрегаем). Следовательно,

$$e_{p\max 70} = \frac{M_{\max}}{M_N} e_{p70} = 2{,}5 \cdot 4{,}2 = 10{,}5 \text{ в}; \quad e_{\text{p. отк } 70} = \frac{M_{\text{отк}}}{M_N} e_{p70} =$$

$$= 2{,}75 \cdot 4{,}2 = 11{,}55 \text{ в};$$

б) $n = 120$ об/мин. Регулирование скорости вращения от 70 до 120 об/мин осуществляется изменением тока возбуждения. В этом случае кратности перегрузки по моменту не соответствуют кратностям перегрузки по току. В общем виде величина реактивной э. д. с. при скорости вращения выше номинальной и регулировании изменением тока возбуждения выражается формулой

$$e_{\text{p max } n_x} = \left(\frac{n_x}{n_N}\right)^2 \frac{M_{\max}}{M_N} e_{pn_N},$$

где $n_x$ — скорость вращения;

$e_{pn_N}$ — реактивная э. д. с. при номинальном токе и номинальной скорости вращения.

В нашем случае

$$e_{\text{p max } 120} = \left(\frac{120}{70}\right)^2 1 \cdot 4{,}2 = 12{,}4 \text{ в};$$

$$e_{\text{p. отк } 120} = \left(\frac{120}{70}\right)^2 \cdot 1{,}1 \cdot 4{,}2 = 13{,}65 \text{ в}.$$

Величина длительной реактивной э. д. с., рассчитанная по этому методу, не должна превышать для машин такого типа 7÷8 *в*; при максимальной рабочей нагрузке 14÷15 *в*; при отключающих перегрузках 17÷18 *в*.

Из вышеизложенного видно, что двигатель удовлетворяет предъявленным к нему требованиям в части перегрузочной способности.

18. Уточнение зазора под добавочным полюсом. По п. 5, X было принято $\xi = 3{,}11 \cdot 10^{-8}$, а в п. 17, XV было получено $\zeta = 3{,}06 \cdot 10^{-8}$; поэтому принятый зазор $\delta_{\text{к}} = 3{,}5$ *см* не пересчитываем.

19. Форма полюсного наконечника и расчет насыщения добавочного полюса. Расчетная ширина полюсного наконечника должна быть приблизительно равна ширине коммутационной зоны. Принимаем $b_{p\text{к}} = 8{,}8$ *см*.

Отношение максимального зазора под добавочным полюсом к минимальному принимаем $\delta_{\text{к max}}/_{\text{к}} = 2$.

Индукция под добавочным полюсом

$$B_{\delta\text{к}} = \frac{e_p}{2w_s L_i v_a 10^{-6}} = \frac{4{,}2}{2 \cdot 1 \cdot 141{,}2 \cdot 9{,}15 \cdot 10^{-6}} = 1620 \text{ гс}.$$

Полезный поток

$$\Phi_{\delta\text{к}} = B_{\delta\text{к}} b_{p\text{к}} l_{m\text{к}} = 1620 \cdot 8{,}8 \cdot 145 = 2{,}07 \cdot 10^6 \text{ мкс } (0{,}0207 \text{ вб}).$$

Коэффициент рассеяния добавочного полюса

$$\sigma_{\text{к}_0} = 1 + \frac{2\mu_0 F_{\text{к}} \lambda_{s\text{к}}}{\Phi_{\delta\text{к}}} = 1 + \frac{2 \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 8600 \cdot 522}{2{,}07 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8}} = 6{,}45,$$

где $\lambda_{s\text{к}}$ — проводимость рассеяния добавочных полюсов:

$$\lambda_{s\text{к}} \approx (l_{p\text{к}} + b_{m\text{к}} + l_p + b_m)\left[\frac{h'_p}{c_p - b_{p\text{к}}} + \frac{h'_m - h'_p}{2(c_m - b_{m\text{к}})}\right] =$$

$$= (145 + 9{,}5 + 144 + 42)\left[\frac{8}{17 - 8{,}8} + \frac{33{,}2 - 8}{2(32{,}2 - 9{,}5)}\right] = 522.$$

Здесь $c_m$ и $c_p$ по рис. 16

$$c_m = \frac{\pi (D + h'_m)}{2p} - b_m = \frac{\pi (250 + 33,2)}{12} - 42 = 32,2 \text{ см}.$$

Полный поток у основания и в середине добавочного полюса

$$\Phi'_к = \sigma_к \Phi_{\delta к} = 6,45 \cdot 2,07 \cdot 10^6 = 13,35 \cdot 10^6 \text{ мкс};$$

$$\Phi_к = \Phi_{\delta к} \left[1 + 0,7 (\sigma_к - 1)\right] = 2,07 \cdot 10^6 \cdot 4,81 = 9,95 \cdot 10^6 \text{ мкс}.$$

Индукция в сердечнике добавочного полюса при номинальной и при максимальной нагрузке

$$B_{mк} = \frac{\Phi_к}{k_п b_{mк} l_{mк}} = \frac{9,95 \cdot 10^6}{0,95 \cdot 9,5 \cdot 145} = 7600 \text{ гс};$$

$$B_{m\,к\,\max} = \frac{I_{\max}}{I_N} B_{mк} = 2,5 \cdot 7600 = 19\,000 \text{ гс}.$$

Так как индукция получилась выше 16 000 *гс*, то во избежание насыщения оставляем ранее принятую ширину сердечника $b_{mк} = 9,5$ *см*, расширив основание полюса до 16,5 *см* (рис. 185).

Учет влияния разделения зазора. Разбиваем зазор под добавочным полюсом $\delta_к = 3,5$ *см* на два зазора: под полюсным наконечником $\delta'_к = 2$ *см*; у ярма $\delta''_к = 1,5$ *см*. При этом коэффициент рассеяния уменьшится и будет равен

$$\sigma_к \approx 1 + (\sigma_{к_0} - 1) \frac{\delta'_к f''}{\delta'_к f'' + \delta''_к f'} = 1 + (6,45 - 1) \frac{2 \cdot 16,5}{2 \cdot 16,5 + 1,5 \cdot 9,5} = 4,8.$$

Индукции

$$B_{mк} = 7600 \frac{1 + 0,7 (\sigma_к - 1)}{1 + 0,7 (\sigma_{к_0} - 1)} = 7600 \frac{1 + 0,7 (3,8)}{1 + 0,7 \cdot 5,45} = 5800 \text{ гс};$$

$$B_{mк\,\max} = 2,5 B_{mк} = 2,5 \cdot 5800 = 14\,500 \text{ гс}.$$

Полюс будет ненасыщенным.

XVI. Кривые максимальных рабочих и отключающих токов и моментов:

$$I_{\max} = f(n); \quad I_{отк} = f(n); \quad M_{\max} = f(n); \quad M_{отк} = f(n).$$

При расчете кривых исходим из величин допустимой реактивной э. д. с. $e_{р\,\max\,доп}$ и $e_{р\,отк.\,доп}$, принимая их соответственно 14 и 17 *в*.

Порядок расчета:

а) определяем величины максимальных оборотов, при которых возможны максимальный рабочий и отключающий токи, оговоренные в задании (кратности токов соответствуют кратностям моментов):

$$n_{x\,\max} = \frac{e_{р\,\max\,доп}}{e_{р\,\max\,N}} n_N = \frac{14}{10,5} 70 = 93,3 \text{ об/мин};$$

$$n_{x\,отк.} = \frac{e_{р\,отк.\,доп}}{e_{р.\,отк\,N}} n_N = \frac{17}{11,55} \cdot 70 = 103 \text{ об/мин};$$

б) определяем значения максимальных рабочих и отключающих токов при различных скоростях вращения при условии постоянства допустимых реактивных э. д. с.

$$I_{x\,\max} = I_{\max} \frac{n_{x\,\max}}{n_x};$$

$$I_{x\,отк} = I_{отк} \frac{n_{x\,отк}}{n_x};$$



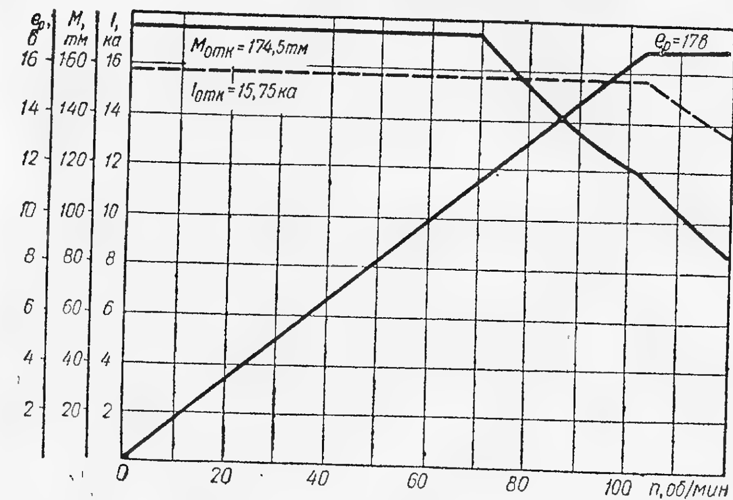



Рис. 188. Зависимость отключающих моментов и токов от скорости вращения.

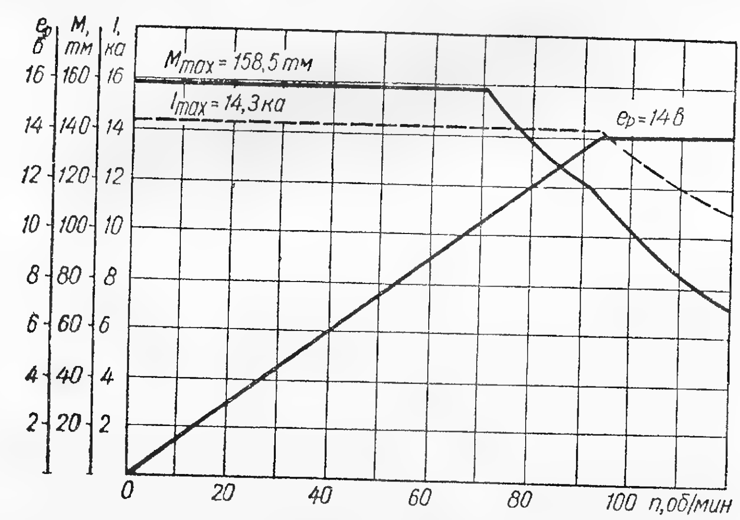



Рис 189. Зависимость максимальных перегрузочных моментов и токов от скорости вращения.

в) определяем величины максимальных рабочих и отключающих моментов по рассчитанным величинам токов по формулам:

$$M_{x\,\max} = \frac{n_N}{n_x} \frac{I_{\max}}{I_N} M_N;$$

$$M_{x\,\text{отк}} = \frac{n_N}{n_x} \frac{I_{\text{отк}}}{I_N} M_N.$$

Задаваясь значениями оборотов, определяем токи и моменты. Данные расчетов сводим в табл. 58*а*, по которым строим кривые (рис. 188, 189).

*Таблица 58а.*

**Данные максимальных и отключающих токов и моментов**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n_x$ (в об/мин) | 70,0 | 80,0 | 93,3 | 103,0 | 110,0 | 115,0 |
| $I_{x\,\max}$ (в *а*) | 14 300,0 | 14 300,0 | 14 300,0 | 12 950,0 | 12 150,0 | 11 580,0 |
| $I_{x\,\text{отк}}$ (в *а*) | 15 750,0 | 15 750,0 | 15 750,0 | 15 750,0 | 14 750,0 | 14 100,0 |
| $M_{x\,\max}$ (в *тм*) | 158,5 | 138,5 | 119,8 | 97,5 | 84,8 | 78,0 |
| $M_{x\,\text{отк}}$ (в *тм*) | 174,5 | 152,5 | 131,1 | 118,1 | 104,1 | 94,9 |

## XVII. Характеристика использования активных материалов. Маховой момент якоря

1. Суммарный вес меди якоря и обмоток полюсов, отнесенный к мощности,

$$g_{\text{Cu}} = \frac{G_{\text{Cu}\,a} + G_{\text{Cu к}} + G_{\text{Cu с}} + G_{\text{Cu с.д.}} + G_{\text{Cu}\,f}}{P_N} =$$

$$= \frac{1800 + 784 + 1265 + 535 + 2720}{4560} = 1{,}56 \text{ кг/квт}.$$

2. Вес железа сердечника якоря

$$G_{\text{Fe}\,a} = \frac{\pi\,[(D - 2h_{\text{п}})^2 - D_{j1}^2]}{4}\, l_{\text{Fe}} \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = \frac{\pi\,[(250 - 2 \cdot 6{,}4)^2 - 196^2]}{4}\, 117 \times$$

$$\times 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 12\,920 \text{ кг}.$$

3. Вес железа зубцов якоря

$$G_{\text{Fe}z} = Zl_{\text{Fe}}h_{\text{п}}b_{z12} \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 318 \cdot 117 \cdot 64 \cdot 1{,}354 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 2520 \text{ кг}.$$

4. Суммарный вес активного железа якоря, отнесенный к мощности.

$$g_{\text{Fe}} = \frac{G_{\text{Fe}a} + G_{\text{Fe}z}}{P} = \frac{12\,920 + 2520}{4560} = 3{,}39 \text{ кг/квт}.$$

5. Общий вес якоря с валом приближенно

$$G \approx 1{,}25\,(G_{\text{Cu}a} + G_{\text{Cuк}} + G_{\text{Fe}}) = 1{,}25\,(1{,}8 + 0{,}784 + 15{,}44) = 18 \text{ т}.$$

6. Маховой момент

$$GD^2 = \frac{1}{2} G \times D^2 = \frac{1}{2} \cdot 18 \cdot 2{,}5^2 = 56 \text{ тм}^2.$$

7. Машинная постоянная

$$C_{\text{A}} = \frac{D^2 l n_N}{P} = \frac{250^2 \cdot 145 \cdot 70}{4560} = 13{,}9 \cdot 10^4.$$



## XVIII. Потери и к. п. д. (§ 10-10)

1. Потери в меди: а) якоря $P_{\text{Cu}a} = 125$ *квт*; б) обмотки добавочных полюсов $P_{\text{Cuк}} = 27{,}7$ *квт*; в) компенсационной обмотки $P_{\text{Cuc}} = 90{,}5$ *квт*.

2. Добавочные потери по гл. 5:
а) в меди

$$p_{\text{Cu}} = p_{\text{Cug}}\left[0{,}07 \frac{l_1}{0{,}5 l_{wa}} \sqrt{\frac{\tau}{b_{\text{к.з}}}}\, m^2\xi^3\right] = 125\left[0{,}07 \frac{126}{237} \sqrt{\frac{65{,}5}{8{,}8}}\, 16 \cdot 0{,}122\right] =$$

$$= 24{,}6 \text{ квт},$$

где $m$ — число слоев по высоте паза;
$\xi$ — приведенная высота проводника

$$\xi = 0{,}15h\sqrt{f} = 0{,}15 \cdot 125\sqrt{7} = 0{,}497;$$

б) в железе

$$p_{\text{Fe}g} = 2pl_pb_p0{,}5 = 12 \cdot 0{,}485 \cdot 1{,}44 \cdot 0{,}5 = 4{,}2 \text{ квт},$$

где 0,5 — потери на квадратный метр поверхности полюсов в *квт*;
в) суммарные

$$p_{\text{доб}} = 24{,}6 + 4{,}2 = 28{,}8 \text{ квт}.$$

По нормам

$$p_{\text{доб}} = 0{,}005IU = 0{,}005 \cdot 5730 \cdot 865 = 24\,800 \text{ вт (24,8 квт)}.$$

3. Потери на коллекторе $p_{\text{п.к}} = 11{,}46$ *квт*; $p_{\text{т.щ}} = 3{,}15$ *квт*; $p_{\text{т.щ. max}} = 5{,}4$ *квт*.

4. Потери в железе ярма и зубцов якоря:
а) при номинальной скорости вращения

$$p_{j1} = \frac{f_N\,(f_N + 70)}{500}\left(\frac{B_{j1}}{10\,000}\right)^2 G_{\text{Fe}a}\, 10^{-3} =$$

$$= \frac{7\,(7 + 70)}{500}\left(\frac{15\,320}{10\,000}\right)^2 12\,920 \cdot 10^{-3} = 32{,}9 \text{ квт};$$

$$p_z = \frac{f_N\,(f_N + 30)}{350}\left(\frac{B_{z12}}{10\,000}\right)^2 G_{\text{Fe}z}\, 10^{-3} =$$

$$= \frac{7\,(7 + 30)}{350}\left(\frac{23\,000}{10\,000}\right)^2 2520 \cdot 10^{-3} = 9{,}9 \text{ квт};$$

б) при максимальной скорости вращения

$$p'_{j1} = \frac{f_{\max}\,(f_{\max} + 70)}{500}\left(\frac{B_{j1}\,\frac{n_N}{n_{\max}}}{10\,000}\right)^2 G_{\text{Fe}a} \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{12\,(12 + 70)}{500}\left(\frac{15\,320\,\frac{70}{120}}{10\,000}\right)^2 12\,920 \cdot 10^{-3} = 20{,}4 \text{ квт}.$$

5. Механические потери (потери на трение и вентиляцию). Для машин $D > 50$ *см* без вентилятора на валу они определяются по формуле

$$p_{\text{т}} = k\left(\frac{v_{aN}}{10}\right)^{1{,}6} P\,\frac{n}{n_N}\, 10^{-2} \text{ квт},$$

где $k = 0{,}09 \div 0{,}13$.

Имеем:

а) при номинальной скорости вращения

$$p_{\text{т}N} = 0{,}13\left(\frac{9{,}15}{10}\right)^{1,6} \cdot 4560 \cdot 10^{-2} = 5{,}8 \text{ квт}.$$

б) при максимальной скорости вращения

$$p_{\text{т max}} = 0{,}3 \cdot 4560 \cdot 10^{-2} = 13{,}6 \text{ квт}.$$

6. Потери в цепи возбуждения

$$p_f = U_f i_f = 110 \cdot 396 \cdot 10^{-3} = 43{,}6 \text{ квт}.$$

7. Сумма потерь при номинальной нагрузке без учета потерь на возбуждение:

а) при номинальной скорости вращения

$$\Sigma p = p_{\text{Cu}a} + p_{\text{Cuк}} + p_{\text{Cu}c} + p_{\text{доб}} + p_{\text{п.к}} + p_{\text{т.щ}} + p_{j1} + p_z + p_{\text{т}} =$$
$$= 125 + 27{,}7 + 90{,}5 + 28{,}8 + 11{,}46 + 3{,}15 + 32{,}9 + 9{,}9 + 5{,}8 = \mathbf{335{,}2} \text{ **квт**};$$

б) при максимальной скорости вращения

$$\Sigma p' = p_{\text{Cu}\,a} + p_{\text{Cu к}} + p_{\text{Cu}\,c} + p_{\text{доб}} + p_{\text{п.к}} + p_{\text{т.щ max}} + p'_{j1} + p'_z + p_{\text{т max}} =$$
$$= 125 + 27{,}7 + 90{,}5 + 28{,}8 + 11{,}46 + 5{,}4 + 20{,}4 + 9{,}9 + 13{,}7 = \mathbf{332{,}8} \text{ **квт**}.$$

8. Подводимая к якорю мощность

$$P = UI \cdot 10^{-3} = 865 \cdot 5730 \cdot 10^{-3} = 4960 \text{ квт}.$$

9. Коэффициент полезного действия:

а) при номинальной скорости вращения

$$\eta_N = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P}\right) 100 = \left(1 - \frac{335{,}2}{4960}\right) 100 = 93{,}25\%;$$

б) при максимальной скорости вращения

$$\eta' = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P}\right) 100 = \left(1 - \frac{332{,}8}{4960}\right) 100 = 93{,}3\%.$$

Ввиду относительно небольшого отличия полученных величин к. п. д. от принятого пересчет потерь не делаем.

## XIX. Тепловой расчет (§ 10-11)

В машинах с принудительной вентиляцией точный тепловой расчет возможен только после вентиляционного расчета, т. е. когда известны скорости воздуха в различных частях машины. Но вначале необходимо сделать приближенный тепловой расчет и определить необходимые расходы и скорости воздуха, как исходные данные для проектирования вентиляционной системы. Такой приближенный расчет и приводится ниже.

1. Общий потребный расход воздуха при $\Delta\ \theta_a = 20°$ C

$$V = \frac{\Sigma p \text{ квт}}{1{,}1\Delta\theta_a} = \frac{335{,}2}{1{,}1 \cdot 20} \approx 16 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

2. Средняя скорость воздуха в радиальных каналах якоря

$$v_s = \frac{V_{\text{к}}}{S_s} = \frac{9{,}6}{1{,}5} = 6{,}4 \text{ м/сек},$$

где $S_s$ — сечение всех каналов

$$S_s = 0{,}5\,\pi\,(D + D_j)\,n_s b_s \approx 1{,}5 \text{ м}^2;$$

$V_{\text{к}}$ — расход воздуха через каналы;

$$V_{\text{к}} \approx 0{,}6V \approx 9{,}6 \text{ м}^3/\text{сек}.$$



3. Среднюю скорость воздуха в лобовых частях принимаем равной

$$v_{\text{л}} \approx 0{,}45\tau_{[\text{см}]} \approx 30 \text{ м/сек}.$$

4. Среднюю скорость воздуха у катушек главных и добавочных полюсов и у поверхности якоря принимаем равными

$$v_f \approx v_{\text{к}} \approx v_\delta = 30 \text{ м/сек}.$$

5. Удельные тепловые нагрузки:

якоря от потерь в железе

$$w_{\text{Fe}} = \frac{p_{\text{Fe}}}{\pi D l_1} = \frac{42{,}8 \cdot 10^3}{\pi \cdot 250 \cdot 126} = 0{,}435 \text{ вт/см}^2;$$

якоря от основных и добавочных потерь в меди:

$$w'_{\text{Cu}} = \frac{p_{\text{Cu}}}{\frac{1}{2} l_w \pi D} = \frac{125 \cdot 10^3}{\frac{1}{2} 473 \cdot \pi \cdot 250} = 0{,}671 \text{ вт/см}^2,$$

$$w''_{\text{Cu}} = \frac{p_{\text{Cu}}(\partial)}{\pi D l_1} = \frac{24{,}5 \cdot 10^3}{\pi \cdot 250 \cdot 126} = 0{,}243 \text{ вт/см}^2;$$

$$w_{\text{Cu}} = 0{,}671 + 0{,}243 = 0{,}914 \text{ вт/см}^2;$$

пазовая изоляция

$$w_i = w_{\text{Cu}} \frac{t_1}{\Pi} = 0{,}914 \frac{2{,}47}{14{,}78} = 0{,}153 \text{ вт/см}^2,$$

где

$$\Pi = 2\,(h_{\text{п}} + b_{\text{п}}) = 2\,(6{,}4 + 0{,}99) = 14{,}78 \text{ см}.$$

Поверхность лобовой части $w \approx w'_{\text{Cu}}$.

Обмотка главных полюсов

$$w_f = \frac{p_f}{S_f} = \frac{i_f^2 r_f}{2pS'_f} = \frac{396^2 \cdot 0{,}259}{12 \cdot 9060} = 0{,}374 \text{ вт/см}^2.$$

Обмотка добавочных полюсов

$$w_{\text{к}} = \frac{p_{\text{к}}}{S_{\text{к}}} = \frac{27{,}7 \cdot 10^3}{12 \cdot 7320} = 0{,}317 \text{ вт/см}^2.$$

Компенсационная обмотка (без учета добавочных потерь):

а) в пазовой части

$$w_{c\text{п}} = \frac{p_c}{(l_c + l_{c\text{д}})2pb_p} = \frac{90{,}5 \cdot 10^3}{(190 + 78{,}5)\,12 \cdot 48{,}5} = 0{,}585 \text{ вт/см}^2;$$

б) в лобовой части

$$w_{c\text{л}} = w_{c\text{п}} \frac{b_p}{z_c \Pi_c} = 0{,}585 \frac{48{,}5}{10 \cdot 14{,}66} = 0{,}194 \text{ вт/см}^2.$$

Коллектор

$$w_{\text{к}} = \frac{1}{\Delta S_{\text{к min}}} = \frac{1}{1{,}395} = 0{,}719 \text{ вт/см}^2.$$

6. Превышения температуры.

Перегрев железа

$$\theta_{\text{Fe}} = \frac{w_{\text{Cu}} + w_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{Fe}}} = \frac{0{,}914 + 0{,}435}{375} \cdot 10^4 = 36° \text{ C},$$

где

$$\alpha_{\text{Fe}} = \alpha_0\left[(1 + \sqrt{v_\delta})\frac{b_{z1}}{t_1} + (1 + \sqrt{v_j})\frac{D_{j1}}{D} + \frac{0{,}6\tau\,(n_s + 1)}{l}(1 + \sqrt{v_s})\right] =$$
$$= 14 \cdot 10^{-4}\left[(1 + \sqrt{30})\frac{1{,}424}{2{,}47} + (1 + \sqrt{15})\frac{196{,}4}{250} + \frac{0{,}6 \cdot 65{,}5 \cdot 20}{145}(1 + \sqrt{6{,}4})\right] =$$
$$= 375 \cdot 10^{-4}.$$

Перепад в изоляции

$$\theta_i = \frac{w_i \Delta_i}{k_i} = \frac{0,153 \cdot 0,184}{16 \cdot 10^{-4}} = 17,6^\circ \text{C}.$$

Перегрев поверхности лобовых частей

$$\theta_л = \frac{w_л}{\alpha_л} \frac{t_1}{\Pi k_0} = \frac{0,671}{320 \cdot 10^{-4}} = 21^\circ \text{C},$$

где

$$\alpha_л \frac{\Pi k_0}{t_1} = 16,7 \cdot 10^{-4} (1 + \sqrt{v_л}) \frac{\Pi k_0}{t_1} = 16,7 \cdot 10^{-4} (1 + \sqrt{30}) \frac{14,78 \cdot 0,5}{2,47} =$$

$$= 320 \cdot 10^{-4}.$$

Средний перегрев меди

$$\theta_{Cu} = \frac{\theta_{Fe} l + \theta_л l_л}{l + l_л} + \theta_i + \theta_a = \frac{36 \cdot 145 + 21 \cdot 91,5}{145 + 91,5} + 17,6 + 10 = 57,8^\circ \text{C}.$$

Обмотка главных полюсов ($v_f = 30$ *м/сек*)

$$\theta_{Cuf} = \frac{w_f}{\alpha_f} + \theta_a = \frac{w_f}{14 \cdot 10^{-4} (1 + \sqrt{v_f})} + 10 = \frac{0,374}{90,5 \cdot 10^{-4}} + 10 = 51,3^\circ \text{C}.$$

Обмотки добавочных полюсов и компенсационная. Так как удельная нагрузка добавочных полюсов и компенсационной обмотки меньше $w_{Cu} + w_{Fe}$, то перегрев их будет ниже, чем $\theta_{Cu}$.

Коллектор

$$\theta_к = \frac{w_к}{\alpha_к} + 5^\circ \text{C} = \frac{0,719}{50 \cdot 10^{-4} (1 + 0,7 \sqrt{30})} + 5 = 35^\circ \text{C}.$$

Как видно, все превышения температуры значительно ниже допустимых для изоляции класса *B*.

В данной машине, принимая во внимание ее режим, предельную реактивную э. д. с. и ответственный характер привода, такой запас по нагреву можно вполне допустить.

Механический расчет дан в примере 2, где приведен вариант расчета двигателя такой же мощности и скорости вращения. Этот вариант отличается тем, что: 1) вместо лягушечьей обмотки применена простая петлевая, 2) диаметр якоря увеличен, длина уменьшена, 3) число полюсов увеличено вдвое. Целесообразность сравнения этих вариантов состоит в том, что второй вариант дает более благоприятные условия коммутации, более простую обмотку и ряд других преимуществ, но динамические свойства его значительно уступают первому варианту вследствие увеличения диаметра якоря.

## *Пример 2*

### Расчет прокатного двигателя (второй вариант)

#### I. Задание

Спроектировать вариант электродвигателя для реверсивного прокатного стана с простой петлевой обмоткой, рассчитанного в примере 1.

Мощность $P = 4560$ *квт*, напряжение $U_N = 860$ *в*, скорость вращения $n = 0 - 70 - 120$ об/мин (расчетная скорость 70 об/мин), коэффициент полезного действия $\eta = 0,92$. Охлаждение — самовентиляция (см. задание примера 1). Методика расчета принята несколько отличной от таковой в примере 1.



#### II. Определение основных размеров (§ 10-2)

Определение размеров произведем по предельной величине напряжения $\varepsilon_к$.

1. Диаметр якоря по формуле (9б)

$$D = \frac{P_i p w_s}{0,5\pi\varepsilon_к A_a} = \frac{4700 \cdot 10^3}{0,5\pi \cdot 16,5 \cdot 500} = 363 \text{ см}.$$

Принимаем $D = 360$ *см*.

(Рассчитываем вариант машины с простой петлевой обмоткой $a = p$ и $w_s = 1$, задавшись значением $\varepsilon_к = 16,5$ *в* и $A = 500$ *а/см*.)

2. Окружная скорость

$$v_a = \pi D n = \pi 360 \frac{70}{60} 10^{-2} = 13,2 \text{ м/сек};$$

$$v_{a\max} = 13,2 \frac{120}{70} = 22,7 \text{ м/сек}.$$

3. Задаемся максимальной частотой 25 *гц* при скорости 120 об/мин. Тогда $p = \frac{60f}{z} = \frac{60 \cdot 25}{120} = 12,5$; принимаем $p = 12$. Частота при $n = 70$ об/мин $f = \frac{12 \cdot 70}{60} = 14$ *гц*; частота при $n = 120$ об/мин $f = \frac{12 \cdot 120}{60} = 24$ *гц*.

4. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 360}{24} = 47,2 \text{ см}.$$

5. Ориентировочная расчетная длина. По рис. 171 находим

$$C_A = \frac{D^2 l_i n}{P_i} = 2,4 \text{ см}^3/\text{дж} \left(\text{или } 14,4 \cdot 10^4 \frac{\text{см}^3 \cdot \text{об}}{\text{ква} \cdot \text{мин}}\right).$$

$$l_i = \frac{C_A P_i}{D^2 n} = \frac{14,4 \cdot 10^4 \cdot 4700}{12,9 \cdot 10^4 \cdot 70} = 75 \text{ см}.$$

Проверяем допустимость этой длины, приняв крайнее верхнее значение $\varepsilon_к = 20$ *в* и $B_\delta = 10\,000$ *гс*,

$$l_{\max} = \frac{\varepsilon_к}{2\alpha_i v_a B_\delta} = \frac{20 \cdot 100}{2 \cdot 0,75 \cdot 13,2 \cdot 1,0} = 101 > 75 \text{ см}.$$

Проверяем $\beta = \frac{\tau}{l_i}$, которое должно быть в пределах 0,4 — 0,8; уточняем $l_i$ после выбора обмотки.

6. Проверим выбор размеров по методу универсальной машинной постоянной. При плотности тока 500 *а/см²*, средней индукции в зубцах $1,5 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*, полном коэффициенте заполнения $k_\varphi = 0,08$ и отношении высоты паза к полюсному делению $\lambda_1 = 0,12$

$$C_s = (s B_{z ср} \sqrt{2}\, \alpha_i k_\varphi)^{-1/4} = (500 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \sqrt{2} \cdot 0,75 \cdot 0,08)^{-1/4} = 3,66;$$

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P_i}{2p} \frac{\beta}{\sqrt{2} f \lambda_1}} = 3,66 \sqrt[4]{\frac{4700 \cdot 10^3 \cdot 0,4}{24 \sqrt{2} \cdot 14 \cdot 0,12}} = 49 \text{ см}.$$

Желая получить минимальный диаметр и маховой момент, принимаем $\tau = 47,2$ *см*, т. е.

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{24 \cdot 47,2}{\pi} = 360 \text{ см}.$$

## III. Выбор обмотки якоря, числа пазов и числа коллекторных пластин (§ 10-4)

Выбираем простую петлевую обмотку.

1. Ток в якоре и в одной ветви

$$I_a = 5730\ a;\ i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{I_a}{2p} = \frac{5730}{24} = 238\ a.$$

2. Диаметр коллектора принимаем (ориентировочно)

$$D_к = 0{,}75D = 0{,}75 \cdot 360 = 270\ см.$$

3. Максимально возможное число коллекторных пластин

$$K_{max} = \frac{\pi D_к}{t_{кmin}} = \frac{\pi \cdot 270}{0{,}7} = 1210,$$

где при принятых $\beta_к = 0{,}6\ см$, $\beta_i = 0{,}1\ см$

$$t_{кmin} = \beta_к + \beta_i = 0{,}6 + 0{,}1 = 0{,}7\ см.$$

4. Полезный поток машины (ориентировочно)

$$\Phi = B_\delta \alpha_i \tau l_i = 1{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}75 \cdot 47{,}2 \cdot 75 = 0{,}266\ вб.$$

5. Число активных стержней (ориентировочно)

$$E = U\left(1 - \frac{1-\eta_N}{2}\right) = 822\ в;$$

$$N = \frac{Ea}{pn\Phi} = \frac{822 \cdot 12 \cdot 60}{12 \cdot 70 \cdot 0{,}266} = 2640.$$

6. Число коллекторных пластин (ориентировочно)

$$K = \frac{N}{2w_s} = \frac{2640}{2 \cdot 1} = 1320.$$

7. Число пазов:

а) ориентировочное число пазов по § 10-4

$$Z = \frac{\pi D s \lambda^2 \lambda_2 \varphi_{Cu}}{A} = \frac{\pi \cdot 360 \cdot 500 \cdot 0{,}5^2 \cdot 4 \cdot 0{,}3}{500} \approx 339,$$

где принято $s = 500\ a/см^2$; $A = 500\ a/см$; $\lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0{,}5$; $\lambda_2 = \frac{h_п}{b_п} = 4$; коэффициент заполнения $\varphi_{Cu} = 0{,}3$;

б) из условия $Zu = K$, учитывая ориентировочные значения $K$, определенные выше, задаемся величиной $u = 3$ и получаем

$$Z = \frac{K}{u} = \frac{1320}{3} \approx 440.$$

Желая уменьшить число пазов, а также принимая во внимание условия симметрии, уменьшаем число пластин до $K = 1116$ и получаем окончательно

$$Z = \frac{K}{u} = \frac{1116}{3} = 372.$$

8. Из условий симметрии $\frac{Z}{p}$ — целое число:

$$\frac{Z}{p} = \frac{372}{12} = 31.$$

9. Число коллекторных пластин (окончательно)

$$K = Zu = 372 \cdot 3 = 1116.$$



10. Коллекторное деление оставляем без изменения

$$t_к = 0{,}6 + 0{,}1 = 0{,}7.$$

11. Диаметр коллектора

$$D_к = \frac{Kt_к}{\pi} = \frac{1116 \cdot 0{,}7}{\pi} = 248\ см.$$

Принимаем (§ 10-4) $D_к = 250\ см$.

12. Число активных стержней

$$N = 2w_s K = 2 \cdot 1 \cdot 1116 = 2232.$$

13. Окончательные обмоточные данные:

$$Z = 372;\quad K = 1116;\quad N = 2232,\quad w_s = 1;\quad u = 3;\quad a = p = 12;$$

$$y_к = y = 1;$$

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon = \frac{1116}{24} - \varepsilon = 46\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2} = 45;$$

$y_{1п} = \frac{y_1}{u} = \frac{45}{3} = 15$ (равносекционная обмотка, так как $\frac{y_1}{u}$ — целое число);

$y_2 = y_1 - y = 45 - 1 = 44.$

14. Уточняем величины $\Phi$ и $A$:

$$\Phi = \frac{Ea}{pnN} = \frac{822 \cdot 12}{12\frac{70}{60}2232} = 0{,}315\ вб;$$

$$A = \frac{i_a N}{\pi D} = \frac{238 \cdot 2232}{\pi \cdot 360} = 470\ a/см.$$

15. Расчетная длина (окончательно), приняв $B_\delta = 10\,300\ гс$,

$$l_i = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau B_\delta} = \frac{0{,}315 \cdot 10^8}{0{,}75 \cdot 47{,}2 \cdot 10\,300} \approx 86{,}5\ см.$$

## IV. Число и размеры пазов, уточнение длины якоря (§ 10-5)

1. Число каналов и длина всех пакетов

$$n_s = \frac{l_i - l'}{l' + 0{,}5b_s} = \frac{86{,}5 - 6{,}5}{6{,}5 + 0{,}5 \cdot 1} = 11;\quad l_1 = 86{,}5 - 0{,}5 \cdot 10 \cdot 1 = 81{,}5\ см;$$

принимаем $n_s = 10$.

2. Полная активная длина

$$l = l_1 + n_s b_s = 81{,}5 + 10 = 91{,}5\ см.$$

3. Зубцовый шаг по наружному диаметру якоря

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 360}{372} = 3{,}04\ см.$$

4. Принимаем соотношение $\lambda = 0{,}4$, т. е. несколько меньшим, чем принятое выше, чтобы не получить чрезмерного насыщения зубцов, так как индукция в зазоре после окончательного выбора обмотки увеличилась. Тогда ориентировочно

$$b_п = t_1\lambda = 3{,}04 \cdot 0{,}4 = 1{,}215\ см.$$

5. Выбираем изоляцию класса В, для которой $\Delta_b \approx 4\ мм$ и $\Delta_h = 6{,}2\ мм$.

6. Толщина обмоточной меди при прямоугольном профиле

$$b = \frac{b_п - \Delta_b}{u} = \frac{1{,}215 - 0{,}4}{3} = 0{,}27\ см\ (2{,}7\ мм).$$

7. При выбранной плотности тока $s \approx 5$ *а/мм²* сечение обмоточной меди

$$q_{Cu} = \frac{i_a}{s} = \frac{238}{5} = 47,5 \ мм^2.$$

8. Высота обмоточной меди

$$h = \frac{g_{Cu}}{b} = \frac{47,5}{2,7} = 17,8 \ мм.$$

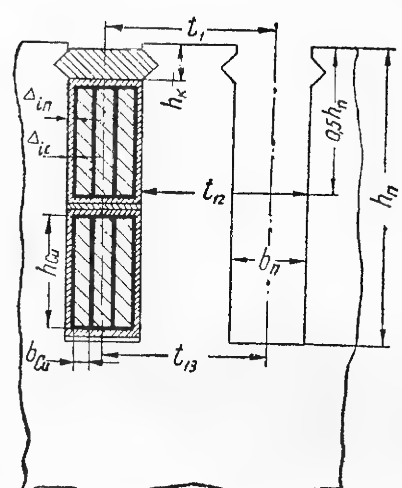



Рис. 190. Разрез паза якоря.

9. Выбираем стандартную обмоточную медь с размерами $b \times h = 3,05 \times 19,5 = 59$ *мм²*.

10. Окончательная плотность тока в обмотке якоря

$$s_a = \frac{238}{59} = 4,04 \ а/мм^2.$$

11. Точные размеры паза. Обмотка выполняется из голой обмоточной меди с непрерывной изоляцией из микаленты. Каждая секция изолирована двумя слоями микаленты вполнахлеста общей толщиной 0,3 *мм* на сторону. Катушки обмотки имеют пазную изоляцию, состоящую из трех слоев микаленты вполнахлеста общей толщиной 1 *мм* на сторону и одного слоя тафтяной ленты впритык (приложение IV).

При расположении стержней в пазу, указанном на рис. 190, получим следующее заполнение паза:

| | По ширине паза $b_п$ (в *мм*) | По высоте паза $h_п$ (в *мм*) |
|---|---|---|
| Медь голая | 3 × 3,05 = 9,15 | 2 × 19,5 = 39 |
| Секционная изоляция | 6 × 0,3 = 1,8 | 4 × 0,3 = 1,2 |
| Пазная изоляция | 2 × 1,0 = 2,0 | 4 × 1,0 = 4,0 |
| Тафтяная лента | 2 × 0,25 = 0,5 | 4 × 0,25 = 1,0 |
| Зазор | 0,3 | 0,3 |
| Прокладки прессшпана | — | 2 × 1 = 2,0 |
| Клин | — | 6,0 |
| Итого: | 13,75 *мм* | 53,5 *мм* |

12. Действительные соотношения

$$\lambda_2 = \frac{h_п}{b_п} = \frac{53,5}{13,75} = 3,9 \quad и \quad \lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0,45$$

не значительно выходят за пределы, принятые выше.

13. Ширина паза из условий максимально допустимой индукции в зубцах

$$b_п = \frac{\pi(D - 2h_п)}{z} - \frac{B_\delta t_1 l_i}{B'_{z3} l_{Fe}} = \frac{\pi(360 - 2 \cdot 5,35)}{372} - \frac{1,03 \cdot 10^{-4} \cdot 3,04 \cdot 86,5}{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 75,8} = 1,395,$$

где

$$B'_{z3} = B'_{z\,max} = 2,3 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2;$$

$$l_{Fe} = l_1 k_п = 81,5 \cdot 0,93 = 75,8.$$



Действительная ширина паза $b_п = 1,31$ *см*, т. е. индукция в корне зуба будет меньше предельно допустимой.

14. Сопротивление обмотки якоря и потери в меди.

Длина полувитка обмотки якоря

$$\frac{1}{2} l_w = l_a + l_л = l + (1,4\tau + 2h_п) = 91,5 + 76,7 \approx 170 \ см.$$

Общая длина обмоточного провода

$$L_{об} = \frac{1}{2} l_w N = 170 \cdot 2232 = 380\,000 \ см.$$

Сопротивление обмотки якоря и основные потери в меди якоря

$$r_a = \frac{L_{об}\,\rho_{75}}{(2a)^2 q_{Cu}} = \frac{380 \cdot 10^3 \cdot 2,17 \cdot 10^{-6}}{(24)^2 \cdot 0,595} = 0,00242 \ ом;$$

$$p_a = I_a^2 r_a = 5730^2 \cdot 0,00242 \approx 80 \cdot 10^3 \ вт.$$

## V. Расчет магнитной цепи

1. Коэффициент Картера

$$k_c = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} = \frac{3,04 + 10 \cdot 0,8}{1,665 + 10 \cdot 0,8} = 1,145,$$

где $b_{z1} = t_1 - b_п = 3,04 - 1,375 = 1,665$ *см*.

$$\delta' = k_c \delta = 1,145 \cdot 0,8 = 0,915 \ см.$$

2. М. д. с. в воздушном зазоре на пару полюсов

$$2F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta' = \frac{2}{0,4\pi \cdot 10^{-8}} 1,03 \cdot 10^{-4} \cdot 0,915 = 14\,900 \ а.$$

3. Находим напряженность магнитного поля в зубцах, для чего по определенным ранее размерам необходимо вычертить в поперечном разрезе зубец и паз (рис. 190). Марка стали Э12.

При индукциях в зубце больше $B_z = 1,8 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²* (1,8 *вб/м²*) считают, что часть потока вытесняется из зубца в паз, и действительная индукция в зубце в сечении $x$ рис. 21 определится по формуле

$$B_{zx} = B'_{zx} - \mu_0 H_{zx} k_{zx},$$

где

$$k_{zx} = \frac{t_x l_i}{b_{zx} l_{Fe}} - 1;$$

$$B'_{zx} = B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{xz} l_{Fe}} \quad или \quad B'_{xz} = B_\delta (k_z + 1) \frac{t_1}{t_x},$$

причем $B'_{zx}$ — индукция в зубце без учета вытеснения потока в паз (расчетная индукция).

В данной машине разница между индукциями в трех сечениях зубца незначительна и можно просто рассчитывать индукцию по среднему сечению, которая равна

$$B'_{z2} = B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{z\,ср} l_{Fe}} = 1,03 \frac{3,04 \cdot 86,5}{1,625 \cdot 75,8} = 2,2 \ вб/м^2.$$

По кривым намагничивания определяем напряженности поля

$$H_{z2} \approx 600 \ а/см.$$

4. М. д. с. зубцов на пару полюсов

$$2F_{z1} = 2h_п H_z = 2 \cdot 5,35 \cdot 600 = 6420 \ а.$$

5. Напряженность магнитного поля в ярме якоря.

Средняя индукция в ярме якоря

$$B_{j_1} = \frac{0{,}5\Phi}{h_{j_1} l_{Fe}} = \frac{0{,}5 a_i \tau l_i}{h_{j_1} l_{Fe}} B_\delta,$$

откуда

$$h_{j_1} = \frac{B_\delta a_i \tau l_i}{B_{j_1} 2 l_{Fe}}.$$

Принимая $B_{j_1} = 1{,}35$ *вб/м²*, определяем высоту ярма якоря

$$h_{j_1} = \frac{1{,}03}{1{,}4} \cdot \frac{0{,}7 \cdot 47{,}2 \cdot 86{,}5}{2 \cdot 75{,}8} = 15{,}1 \text{ см}$$

и по приложению II $H_j = 7{,}5$ *а/см*.

6. М. д. с. ярма на пару полюсов

$$2F_{j_1} = L_{j_1} H_{j_1} = 47{,}2 \cdot 7{,}5 = 354 \text{ а},$$

где $L_{j_1} \approx \tau = 47{,}2$ *см*.

7. Принимая индукцию в сердечнике главного полюса $B_m = 1{,}7$ *вб/м²*, по кривой намагничивания находим $H_m = 65 \frac{а}{см}$.

Коэффициент рассеяния* $\sigma = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi} = 1{,}25$.

Поток в сердечнике полюса $\Phi_m = \Phi\sigma = 0{,}315 \cdot 1{,}25 = 0{,}394$ *вб*.

8. Сечение сердечника полюса

$$S_m = \frac{\Phi_m}{B_m} = \frac{0{,}394}{1{,}7 \cdot 10^{-4}} = 2320 \text{ см}^2.$$

9. Длину полюса принимаем

$$l_m = 5 \text{ см}.$$

Полюс выполняется из листовой стали толщиной 1 *мм*, для которой $k_п = 0{,}95$.

10. Ширина полюса

$$b_m = \frac{S_m}{l_m k_п} = \frac{2320}{95 \cdot 0{,}95} \approx 26 \text{ см}.$$

11. Высота полюса определяется по эскизу таким образом, чтобы сечение пространства между полюсами было достаточным для размещения меди обмотки возбуждения с учетом коэффициента заполнения и для прохождения вентилирующего воздуха.

Ориентировочно определяем высоту катушки (обмотки) полюса

$$h_k = \frac{2F_\delta k_п}{2b_k \varphi_f s_f}.$$

Задаваясь $s_f = 2{,}5$ *а/мм²*; $\varphi_f = 0{,}5$; $b_к = 3$ *см* и коэффициентом насыщения $k_н = 1{,}2$, получим

$$h_к = \frac{14\,900 \cdot 1{,}2}{2 \cdot 3 \cdot 0{,}5 \cdot 250} \approx 24 \text{ см}.$$

На основании данных опыта высота катушки может быть также ориентировочно определена по формуле

$$h_к = 0{,}35\tau + (5 \div 9) = 0{,}35 \cdot 47{,}2 + (5 \div 9) = (21{,}5 \div 25{,}5) \text{ см}.$$

* Здесь мы принимаем значение σ по данным опыта. Расчет величины σ может быть произведен по § 10-6.



Учитывая изоляционные прокладки и высоту полюсного наконечника, принимаем

$$h_m = 1{,}1 h_к = 1{,}1 \cdot 25{,}5 = 28 \text{ см}.$$

12. М. д. с. на полюса

$$2F_m = 2h_m H_m = 2 \cdot 28 \cdot 65 = 3640 \text{ а}.$$

13. Предполагая ярмо статора из литой стали, задаемся $B_{j_2} = 1{,}3$ *вб/м²*. По кривым намагничивания определяем $H_{j_2} = 16$ *а/см*.

14. Сечение

$$S_{j_2} = \frac{\Phi_m}{2B_{j_2}} = \frac{0{,}394}{2 \cdot 1{,}3 \cdot 10^4} = 1520 \text{ см}^2.$$

15. Длину ярма можно принять немного большей, чем длина полюса

$$L_{j_2} = l_m + 8 = 95 + 8 = 103 \text{ см}.$$

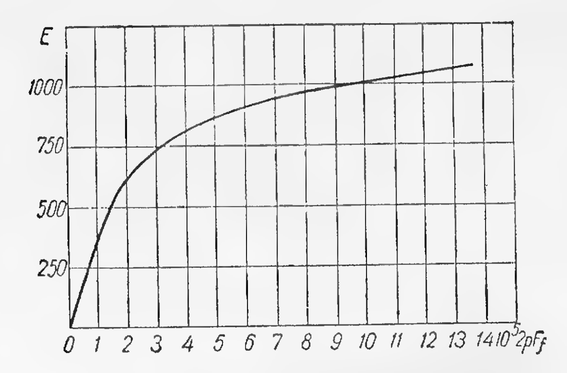



Рис. 191. Характеристика намагничивания прокатного двигателя.

16. Высота ярма

$$h_{j_2} = \frac{S_{j_2}}{l_{j_2}} = \frac{1520}{103} = 14{,}7 \text{ см}.$$

17. Внешний диаметр ярма

$$D_{j_2} = D + 2(\delta + h_m + h_{j_2}) = 360 + 2(0{,}8 + 28 + 14{,}7) = 447 \text{ см}.$$

Принимаем $D_{j_2} = 450$ *см*.

Длина магнитного пути в ярме

$$L_{j_2} = \frac{\pi D_{j_2}}{2p} = \frac{\pi \cdot 450}{24} = 58{,}8 \text{ см}.$$

18. М. д. с. ярма на пару полюсов

$$2F_{j_2} = L_{j_2} H_{j_2} = 58{,}8 \cdot 16 = 940 \text{ а}.$$

19. Суммарная м. д. с. на пару полюсов при холостом ходе

$$2F_f = 2F_{j_1} + 2F_{z1} + 2F_\delta + 2F_m + 2F_{j_2} =$$

$$= 354 + 6420 + 14\,900 + 3640 + 940 = 26\,254 \text{ а}.$$

Аналогичный расчет произведен и для других значений $E$. Характеристика намагничивания представлена на рис. 191.

VI. Обмотка главных полюсов (§ 10-7)

1. Мощность возбуждения

$$p_f = U_f i_f = i_f^2 r_f = i_f^2 \frac{\rho l_{wf} 2pw_f}{q_f c^2} = 2F_f s_f \rho l_{wf} p,$$

где $c$ — число параллельных ветвей;
$s_f$ — плотность тока, принимаемая 2,5 $а/мм^2$;
$l_{wf}$ — длина витка:

$$l_{wf} \approx 2\left[l_p + b_m + \pi\left(b_i + \frac{b_к}{2}\right) + 10\right] = 2\left[95 + 26 + \pi\left(0,3 + \frac{3}{2}\right) + 10\right] = 273 \text{ см}.$$

Получаем

$$p_f = 26\,254 \cdot 250 \cdot 2,17 \cdot 10^{-6} \cdot 273 \cdot 12 = 48,4 \cdot 10^3 \text{ вт (48,4 квт)}.$$

2. Сечение меди обмотки возбуждения получим, задавшись номинальным напряжением возбуждения $U_f = 180$ в, предполагая номинальное напряжение возбудителя 230 в (разница 230 — 180 = 50 в предполагается для обеспечения возможности форсировки поля)

$$q_f = \frac{2F_f \rho l_{wf} p}{U_f c} = \frac{25 \cdot 514 \cdot 2,17 \cdot 10^{-6} \cdot 273 \cdot 12}{180 \cdot 1} = 1,04 \text{ см}^2.$$

3. Ток возбуждения

$$i_f = q_f s_f = 1,04 \cdot 250 = 260,5 \text{ а}.$$

4. Число витков на полюс

$$w_f = \frac{2F_f}{2i_f} = \frac{26\,254}{2 \cdot 260,5} = 50.$$

5. Выбираем обмотку из голой шинной меди, намотанной на ребро, с миканитовой изоляцией между витками толщиной 0,5 мм и с последующей выпечкой и опрессовкой обмотки.

Берем стандартную медь (приложение III) 30×3,53 сечением $q_f = 105,4$ $мм^2$.

Плотность тока

$$s_f = \frac{260,5}{105,4} = 2,47 \text{ а/мм}^2.$$

6. Высота катушки

$$h_к = (w_f + 1)(h + \Delta_i) + 2\Delta_{шайб} = (50 + 1)(0,353 + 0,08) + 2 \cdot 0,8 = 22,1 \text{ см (рис. 185)}.$$

7. Внутренние размеры катушки:

длина

$$l_к = l_m + 2\Delta_к + 2\Delta_i + 2R_к = 95 + 2 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,2 + 2 \cdot 2 = 100 \text{ см};$$

ширина

$$b_к = b_m + 2\Delta_к + 2\Delta_i = 26 + 2 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,2 = 26,7 \text{ см}.$$

8. Средняя длина витка

$$l_{wf} = 2[l_к + b_к + 2b + R_к] = 2[100 + 26,7 + 2 \cdot 3 + 2] = 269,4 \text{ см}.$$

9. Сопротивление одной катушки

$$r_f' = \frac{\rho l_{wf} w_f}{q_f} = \frac{2,17 \cdot 10^{-6} \cdot 269,4 \cdot 50}{1,04} = 0,028 \text{ ом}.$$

10. Сопротивление всей цепи возбуждения

$$r_f = 2pr_f' = 24 \cdot 0,028 = 0,672 \text{ ом}.$$



11. Напряжение возбуждения при холостом ходе

$$U_f = i_f r_f = 260,5 \cdot 0,672 = 175 \text{ в}.$$

12. Потери в обмотке возбуждения при холостом ходе

$$p_f = i_f^2 r_f = 260,5^2 \cdot 0,672 = 45,6 \cdot 10^3 \text{ вт}.$$

VII. Расчет добавочных полюсов и коммутации (§ 10-8)

1. Окружная скорость коллектора

$$v_к = \pi D_к n \, 10^{-2} = \pi 250 \frac{70}{60} 10^{-2} = 9,15 \text{ м/сек};$$

$$v_{к\,max} = 9,15 \cdot \frac{120}{70} = 15,6 \text{ м/сек}.$$

2. Выбираем щетки (приложение VII) марки Г-3, для которых: удельное нажатие на щетку $p_щ = 0,2 \div 0,25$ $кг/см^2$, допустимая плотность тока $s_{max} = 10 \div 11$ $а/см^2$, коэффициент трения $\mu_щ = 0,25$, максимальная окружная скорость $v_{к\,max} = 25$ м/сек.

3. Сечение всех щеток одной полярности

$$S_к = \frac{I_а}{s_щ} = \frac{5730}{11} = 521 \text{ см}^2.$$

4. Ширина щетки $b_щ = 2t_к = 2 \cdot 0,7 = 1,4$ см. По стандарту можно взять щетку размером 1,6 × 3 $см^2$.

5. Общая длина всех щеток на один щеточный болт

$$l_к = \frac{S_к}{pb_щ} = \frac{521}{12 \cdot 1,6} = 27,2 \text{ см}.$$

6. Число щеток, приходящихся на один щеточный болт,

$$n_щ' = \frac{l_к}{l_щ} = \frac{27,2}{3} = 9.$$

7. Потери на трение щеток о коллектор

$$p_{т.щ} = p_щ \cdot \mu_щ \cdot 2S_к \cdot v_к \cdot 9,81 = 0,2 \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 521 \cdot 6,5 \cdot 9,81 = 3320 \text{ вт}.$$

8. Потери в переходном контакте

$$p_{п.к} = I_а \Delta U_щ = 5730 \cdot 2 = 11\,460 \text{ вт},$$

где $\Delta U_щ = 1,9 \pm 0,4$ в; принимаем $\Delta U_щ = 2$ в.

9. Потери, приходящиеся на 1 $см^2$ поверхности коллектора,

$$w_к = \frac{p_{т.щ} + p_{п.к}}{\pi D_к l_к} = \frac{3320 + 11\,460}{\pi \cdot 250 \cdot 27,2} = 0,69 \text{ вт/см}^2.$$

10. Перепад температуры на поверхности коллектора

$$\theta_к = \frac{w_к}{\alpha_к} = \frac{0,69}{0,0155} = 44,5 °C,$$

$$\text{где } \alpha_к = 50(1 + 0,7\sqrt{v_к}) = 50(1 + 0,7\sqrt{9,15}) = 155 \frac{вт}{м^2 °C}.$$

11. Удельная мощность, снимаемая с коллектора,

$$\frac{P_a}{\pi D_к l_к} = \frac{4960 \cdot 10^3}{\pi \cdot 250 \cdot 27,2} = 292 \text{ вт/см}^2.$$

12. Ширина коммутационной зоны

$$b_{\text{к.з}} = b_{\text{щ}} \frac{D}{D_{\text{к}}} + \left[u + \frac{K}{2p} - y_1 - \frac{a}{p}\right] \frac{D}{D_k} t_k = 1{,}6 \frac{360}{250} +$$

$$+ \left[3 + \frac{1116}{24} - 45 - 1\right] \cdot 0{,}7 \frac{360}{250} = 5{,}80.$$

13. Щеточное перекрытие

$$\beta = \frac{b_{\text{щ}}}{t_k} = \frac{1{,}6}{0{,}7} = 2{,}3.$$

14. Расчетную ширину полюсного наконечника выбираем равной ширине сердечника, т. е. $b_{m\text{к}} = b_{p\text{к}} \approx b_{\text{к}i} = 6\ см$, а длину наконечника — равной расчетной длине, т. е. $l_{p\text{к}} = l_i = 86{,}5\ см$.

15. Воздушный зазор под добавочным полюсом для крупных машин при толчкообразной нагрузке

$$\delta_{\text{к}} \approx (3 \div 4)\delta.$$

Принимаем

$$\delta_{\text{к}} = \delta'_{\text{к}} + \delta''_{\text{к}} = 1{,}2 + 2 = 3{,}2\ см.$$

16. Расчетная длина якоря для добавочных полюсов может быть принята

$$l_{\text{к}i} = l_i = 86{,}5\ см.$$

17. Индукция в воздушном зазоре под добавочными полюсами

$$B_{\text{к}} = A\zeta = A \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \left[0{,}6 \frac{h_{\text{п}}}{b_{\text{п}}} + 0{,}5 \frac{l_{\text{л}}}{l} + \lambda_{\text{к}}\right] =$$

$$= 470 \cdot 4{,}4 \cdot 10^{-8} = 0{,}207 \cdot 10^{-4} \frac{вб}{см^2},$$

где

$$\lambda_{\text{к}} = 0{,}15 \frac{b_{p\text{к}}}{\delta'_{\text{к}}} = 0{,}15 \frac{6}{1{,}2} = 0{,}75;$$

$$A = 470\ а/см;$$

$$\frac{h_{\text{п}}}{b_{\text{п}}} = \frac{53{,}5}{13{,}75} = 3{,}9;$$

$$0{,}5 \frac{l_{\text{л}}}{l} = 0{,}5 \frac{76{,}7}{91{,}5} = 0{,}419;$$

$$\zeta \approx 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} (0{,}6 \cdot 3{,}9 + 0{,}419 + 0{,}75) \approx 4{,}4 \cdot 10^{-8}.$$

18. Реактивная э.д.с.

$$e_{\text{р}} = 2Aw_s v_a l_i \zeta = 2 \cdot 470 \cdot 1 \cdot 1320 \cdot 86{,}5 \cdot 4{,}4 \cdot 10^{-8} = 4{,}7\ в.$$

19. Необходимый полезный поток добавочного полюса

$$\Phi_{\text{к}} = B_{\text{к}} l_{\text{к}i} b_{p\text{к}} = 0{,}207 \cdot 10^{-4} \cdot 86{,}5 \cdot 6 \approx 0{,}0107\ вб.$$

У таких крупных машин добавочные полюса обычно выполняются с различным сечением сердечника по высоте и с регулируемым зазором между полюсом и ярмом.

Принимаем ширину основания полюса $b_{p\text{к}} = 2b'_{m\text{к}} = 12\ см$ и регулируемый зазор $\delta''_{\text{к}} = 2\ см$.



20. Индукция в регулируемом зазоре определится приближенно как

$$B''_{\text{к}} = \frac{\Phi_{\text{к}} \sigma_{\text{к}}}{l_{\text{к}} b_{\text{к}1}} = \frac{0{,}0107 \cdot 2{,}2}{86{,}5 \cdot 12} \approx 0{,}22 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2,$$

где $\sigma_{\text{к}}$* — коэффициент рассеяния дополнительного полюса; принят равным 2,2.

21. М.д.с. добавочных полюсов на пару полюсов при наличии компенсационной обмотки

$$2F_{\text{к}} = 2 \frac{B'_{\text{к}} \delta'_{\text{к}}}{\mu_0} + A(\tau - b_p) + 2 \frac{B''_{\text{к}} \delta''_{\text{к}}}{\mu_0} + \sum F_{\text{Fe}} =$$

$$= 2 \frac{0{,}207 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}2}{0{,}4\pi \cdot 10^{-8}} + 470 (47{,}2 - 0{,}7 \cdot 47{,}2) + 2 \frac{0{,}22 \cdot 10^{-4} \cdot 2}{0{,}4\pi \cdot 10^{-8}} = 19\,400\ а,$$

где $b_p = \alpha\tau$.

Величиной магнитодвижущей силы $\Sigma F_{\text{Fe}}$, необходимой для проведения потока $\Phi_{\text{к}}$ через магнитопровод, пренебрегаем, так как железо в добавочных полюсах не насыщено **.

22. Число витков на полюс

$$w_{\text{п.к}} = \frac{2F_{\text{к}}}{2I} = \frac{19\,400}{2 \cdot 5730} = 1{,}7.$$

Для удобства выполнения обмотку разбиваем на две параллельные группы ($c = 2$) и принимаем по три витка на полюс

$$w_{\text{п.к}} = 3 \text{ при } I_{\text{к}} = \frac{I}{2} = \frac{5730}{2} = 2865\ а.$$

23. Приняв плотность тока $s_{\text{к}} = 2{,}5\ а/мм^2$, определяем сечение меди обмотки добавочных полюсов

$$q_{\text{к}} = \frac{2865}{2{,}5} = 1150\ мм^2.$$

Выбираем медь $4 \times 10 \times 30$ суммарным сечением $1200\ мм^2$.
Действительная плотность тока

$$s_{\text{к}} = \frac{2865}{1200} = 2{,}4\ а/мм^2.$$

24. Средняя длина витка

$$l_{w\text{к}} = 2l_{p\text{к}} + \pi(b_{m\text{к}} + b_{\text{Cuк}} + \Delta_i) = 2 \cdot 95 + \pi(6 + 3 + 0{,}6) = 220\ см.$$

25. Сопротивление обмотки добавочных полюсов

$$r_{\text{к}} = \frac{\rho l_{w\text{к}} w_{\text{п.к}} 2p}{q_{\text{к}} c^2} = \frac{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 220 \cdot 3 \cdot 24}{12 \cdot 2^2} = 0{,}00071\ ом.$$

26. Потери в обмотке добавочных полюсов

$$p_{\text{к}} = I_a^2 r_{\text{к}} = 5730^2 \cdot 0{,}00071 = 23{,}4 \cdot 10^3\ вт.$$

## VIII. Компенсационная обмотка (§ 10-9)

1. Число витков компенсационной обмотки на пару полюсов

$$w_c = \frac{b_p}{\tau} \frac{N}{4ap} \approx \alpha_i \frac{N}{4ap} = 0{,}75 \frac{2232}{4 \cdot 12 \cdot 12} = 2{,}9;$$

принимаем 3 витка.

---

* Коэффициент рассеяния $\sigma_{\text{к}}$ при наличии зазора у ярма уменьшается. При отсутствии зазора он доходит до значения $\sigma_{\text{к}} = 4 \div 5$ (§ 10-8).

** Возможность пренебрежения $\Sigma F_{\text{Fe}}$ необходимо проверить расчетом индукции в дополнительном полюсе ($B_{\text{к}} \leqslant 1{,}5 \div 1{,}6\ вб/м^2$).

2. Сечение меди компенсационной обмотки при плотности тока $s_c = 3{,}04$ *а/мм²*

$$q_c = \frac{I_a}{s_c} = \frac{5730}{3{,}04} = 1890 \text{ мм}^2.$$

Берем медь $50 \times 12$ сечением 600 *мм²*, тогда потребуется $\frac{1890}{600} = 3{,}15$ параллельных стержня. Принимаем 3 параллельных стержня общим сечением $q_c = 3 \cdot 600 = 1800$ *мм²*.

Таким образом, каждый полюс будет иметь $n_c = 3 \times 3 = 9$ пазов (10 делений).

Ширина паза

$$b_{пc} = b_{Cu} + \Delta_i = 1{,}2 + 0{,}2 = 1{,}4 \text{ см}.$$

Ширина зубца

$$b_{zc} = \frac{\alpha_i \tau - n_c b_{пc}}{n_c + 1} = \frac{0{,}7 \cdot 47{,}2 - 9 \cdot 1{,}4}{9 + 1} = 2{,}04 \text{ см}.$$

3. Сопротивление компенсационной обмотки

$$r_c = \frac{\rho l_{wc} w_c p}{q_c} = \frac{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 324{,}4 \cdot 3 \cdot 12}{18} = 0{,}00141 \text{ ом},$$

где $l_{wc}$ — средняя длина витка:

$$l_{wc} = 2l_m + 2\tau + 4l'_c = 2 \cdot 95 + 2 \cdot 47{,}2 + 4 \cdot 10 = 324{,}4 \text{ см};$$

$l'_c$ — средний вылет стержня компенсационной обмотки; принимаем $l'_c = 10$ *см*.

4. Потери в компенсационной обмотке

$$p_c = I_a^2 r_c = 5730^2 \cdot 0{,}00141 = 46{,}5 \cdot 10^3 \text{ вт}.$$

## IX. Расчет весов и удельных расходов активных материалов

1. Вес меди якоря

$$G_{Cua} = L_{об} q \gamma = 380 \cdot 10^3 \cdot 0{,}595 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 2000 \text{ кг}.$$

2. Вес меди главных полюсов

$$G_{Cuf} = 2pl_{wf} w_f q_f \gamma = 24 \cdot 269{,}4 \cdot 50 \cdot 1{,}01 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 2900 \text{ кг}.$$

3. Вес меди добавочных полюсов

$$G_{Cuк} = 2pl_{wк} w_к q_к \gamma = 24 \cdot 220 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 1690 \text{ кг}.$$

4. Вес меди компенсационной обмотки

$$G_{Cuc} = pw_c l_{wc} q_c \gamma = 12 \cdot 3 \cdot 324 \cdot 18 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 1870 \text{ кг}.$$

5. Вес зубцов якоря

$$G_z = l_{Fe} h_п b_{zср} Z \gamma_{Fe} = 79 \cdot 5{,}35 \cdot 1{,}625 \cdot 372 \cdot 7{,}9 \cdot 10^{-3} \approx 2000 \text{ кг}.$$

6. Вес ярма якоря

$$G_{j1} = l_{Fe}\pi \left[\left(\frac{D - 2h_п}{2}\right)^2 - \left(\frac{D - (2h_п + 2h_{j1})}{2}\right)^2\right] \gamma_{Fe} =$$

$$= 79\pi (174{,}6^2 - 159{,}6^2) \cdot 7{,}9 \cdot 10^{-3} = 9820 \text{ кг}.$$

7. Удельный расход меди (без коллектора)

$$q_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P} = \frac{G_{Cua} + G_{Cuf} + G_{Cuк} + G_{Cuc}}{P} =$$

$$= \frac{2000 + 2900 + 1690 + 1870}{4950} = \frac{8460}{4950} = 1{,}72 \text{ кг/квт}.$$



Удельный расход электротехнической стали

$$q_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P} = \frac{G_{z1} + G_{j1}}{P} = \frac{2000 + 9820}{4950} = \frac{11\,820}{4950} \approx 2{,}4 \text{ кг/квт}.$$

## X. Расчет потерь и к. п. д. (§ 10-10)

1. Полные потери в меди якоря с учетом потерь от вихревых токов

$$p_a = I_a^2 r_a k_r; \quad k_r = 1 + 0{,}07 \frac{l}{0{,}5 l_w} \sqrt{\frac{\tau}{b_{к.з}}}\, m^2 \xi^3,$$

где $b_{к.з}$ — ширина коммутационной зоны;

$m$ — число слоев в пазу;

$\xi$ — приведенная высота проводника (§ 5-10).

При $\theta_{Cu} = 20°$ C $\xi_{20} = 0{,}15h\sqrt{f} = 0{,}15 \cdot 1{,}95\sqrt{10} = 0{,}925$; при $\theta_{Cu} = 50°$ C $\xi_{50} = \xi_{20}\sqrt{\frac{235 + 20}{235 + 50}} = 0{,}946\xi_{20}$;

$$k_{r20} = 1 + 0{,}07 \frac{91.5}{170} \sqrt{\frac{47{,}2}{5{,}8}} \cdot 2^2 \cdot 0{,}925^3 = 1{,}34;$$

$$k_{r50} = (k_{r20} - 1)\left(\frac{\xi_{50}}{\xi_{20}}\right)^2 + 1 = 0{,}34 \cdot 0{,}946^3 + 1 = 1{,}288;$$

$$p_a = p_{Cua} k_{r50} = 80 \cdot 1{,}288 = 103 \text{ квт}.$$

2. Потери в меди главных полюсов, добавочных полюсов и компенсационной обмотки

$$p_f = 44 \text{ квт}; \; p_к = 23{,}4 \text{ квт и } p_c = 46{,}5 \text{ квт}.$$

3. Потери в зубцах и ярме якоря по § 10-10

$$p_z = \frac{f(f + c_{1z})}{c_{2z}} \left(\frac{B_{zср}}{10^{-4}}\right)^2 G_z = \frac{10(10 + 30)}{350} \left(\frac{2{,}11 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}}\right)^2 \cdot 2080 = 10{,}5 \cdot 10^3 \text{ вт};$$

$$p_j = \frac{f(f + c_{1j})}{c_{2j}} \left(\frac{B_{j1}}{10^{-4}}\right)^2 G_j = \frac{10(10 + 70)}{500} \left(\frac{1{,}35 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}}\right)^2 \cdot 9820 = 28{,}6 \cdot 10^3 \text{ вт}.$$

4. Механические потери при $n_N$

$$p_m = 0{,}13 \left(\frac{v_a}{10}\right)^{1{,}6} \frac{P_N}{n_N} \frac{n}{100} = 0{,}13 \left(\frac{13{,}2}{10}\right)^{1{,}6} \frac{4560}{100} \approx 10 \text{ квт}.$$

5. Потери на коллекторе

$$p_к = p_{т.щ} + p_{п.к} = 3320 + 11\,460 = 14\,780 \text{ вт}.$$

6. Потери на поверхности полюсных наконечников и пульсационные потери в зубцах компенсационной обмотки $p_0$ можно рассчитать по гл. 5. При расслоенных наконечниках эти потери незначительны, поэтому их не определяем, но все неучтенные потери такого рода учитываем добавкой 0,1% от $P_N$, т. е. $p_0 = 4{,}95$ *квт*.

7. Сумма потерь

$$\Sigma p = p_a + p_{Cuf} + p_{Cuк} + p_{Cuc} + p_z + p_j + p_{п2} + p_m + p_к + p_0 =$$

$$= 103 + 45{,}6 + 23{,}4 + 46{,}5 + 10{,}5 + 28{,}6 + 10 + 14{,}78 + 4{,}95 \approx 287 \text{ квт}.$$

8. Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{287}{4560 + 287} = 0{,}941.$$

## XI. Тепловой расчет (§ 10-11)

1. Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в железе

$$w_{\text{Fe}} = \frac{p_{\text{Fe}}}{\pi D l} = \frac{39\,100}{\pi 360 \cdot 91{,}5} = 0{,}378 \ \textit{вт/см}^2,$$

где

$$p_{\text{Fe}} = p_z + p_j = 10{,}5 + 28{,}6 = 39{,}1 \ \textit{квт}.$$

2. То же от потерь в меди пазовой части

$$w_{\text{п}} = \frac{p_{\text{Cuп}}}{\pi D 0{,}5 l_{wa}} = \frac{p_a \frac{k_{r_{\text{п}}}}{k_r}}{\pi D 0{,}5 l_w} = \frac{103 \cdot 10^3 \cdot \frac{1{,}535}{1{,}288}}{\pi 360 \cdot 170} = 0{,}639,$$

где $k_{r_{\text{п}}}$ — коэффициент сопротивления в пазовой части:

$$k_{r_{\text{п}}} = 1 + (k_r - 1)\frac{0{,}5 l_w}{l} = 1 + 0{,}288 \cdot \frac{170}{91{,}5} = 1{,}535.$$

3. Удельная тепловая нагрузка от потерь в лобовых частях

$$w_{\text{л}} = \frac{p_{\text{л}}}{\pi D l_{\text{л}}} = \frac{p_a - p_{\text{п}}}{\pi D l_{\text{л}}} \approx \frac{(103 - 66) \cdot 10^3}{\pi \cdot 360 \cdot 76{,}7} = 0{,}427,$$

где

$$p_{\text{п}} = p_a \frac{k_{r_{\text{п}}}}{k_r} \frac{l}{0{,}5 l_w} = 103 \cdot 10^3 \cdot \frac{1{,}535}{1{,}288} \frac{91{,}5}{170} = 66 \cdot 10^3 \ \textit{вт}.$$

4. Эквивалентная удельная теплоотдача от железа якоря при радиальной вентиляции

$$\alpha_{\text{Fe}} = \frac{l_{\text{Fe}}}{l}\left[\alpha_\delta \frac{b_{z1}}{t_1} + \alpha_j \frac{D_i}{D} + \frac{\alpha_s k_{ss}}{1 + \frac{\alpha_s l'}{6 k_x}}\right],$$

где

$$k_{ss} = \frac{0{,}6\tau}{l'} = \frac{0{,}6 \cdot 47{,}2}{6{,}5} = 4{,}35;$$

$l'$ — ширина одного пакета.

Теплоотдача в зазоре

$$\alpha_\delta = 0{,}0028\,(1 + \sqrt{0{,}5 v_a}) = 0{,}0028\,(1 + \sqrt{0{,}5 \cdot 13{,}2}) = 0{,}01 \ \textit{вт/см}^2\,{}^\circ C.$$

Теплоотдачу от внутренней поверхности ярма $\alpha_j$ принимаем минимум 0,0028 $\textit{вт/см}^2\,{}^\circ C$, так как скорость воздуха у входа в каналы незначительна.

Задаемся скоростью в радиальных каналах $v_s = 3$ *м/сек*, что соответствует расходу через каналы $V_s = 7{,}5$ *м³/сек*. Сечение каналов $S_{\text{к}} = 22 \cdot 1\pi \cdot 360 = 25\,000$ *см²*. Коэффициент теплоотдачи в радиальных каналах

$$\alpha_s = 0{,}0016\,(1 + \sqrt{v_s}) = 0{,}0044 \ \textit{вт/см}^2\,{}^\circ C.$$

Коэффициент теплопроводности пакета поперек листов по гл. 6

$$k_x = 0{,}01 \ \textit{вт/см}\,{}^\circ C.$$

Получаем

$$\alpha_{\text{Fe}} = \frac{75{,}8}{91{,}5}\left[100\,\frac{1{,}66}{3{,}04} + 28\,\frac{319{,}2}{360} + \frac{44 \cdot 4{,}35}{1 + \frac{6{,}5 \cdot 44}{6 \cdot 100}}\right] 10^{-4} = 0{,}0173 \ \textit{вт/см}^{2\circ} C.$$

5. Удельная тепловая проводимость изоляции паза на длине пакетов, отнесенная к $\pi D l$,

$$\alpha_i = \frac{\kappa_i}{\Delta_i} k_{s_{\text{п}}} = \frac{0{,}0015}{0{,}1} \cdot 3{,}66 = 0{,}055 \ \textit{вт/см}^2\,{}^\circ C,$$

$$k_{s_{\text{п}}} = \frac{S_{12}}{\pi D l} = 2\,\frac{b_{\text{п}}}{t_1}\left(1 + \frac{h_{\text{п}}}{b_{\text{п}}}\right)\frac{l_{\text{Fe}}}{l} = 2 \cdot \frac{1{,}375}{3{,}04}\left(\frac{5{,}35}{1{,}375} + 1\right)\frac{75{,}8}{91{,}5} = 3{,}66.$$



Согласно гл. 6 принимаем $k_i = 0{,}0015$ $\textit{вт/см}\,{}^\circ C$.

6. Коэффициент теплоотдачи лобовых частей $\alpha_{\text{л}}$ находится по рис. 61 или по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = 0{,}00167\,(1 + \sqrt{0{,}4 v_a}) = 0{,}00167\,(1 + \sqrt{0{,}4 \cdot 13{,}2}) = 0{,}0055 \ \textit{вт/см}^{2\circ} C.$$

7. Условное превышение температуры в пазовой части

$$\theta_1' = w_{\text{Cu}}\left(\frac{1}{\alpha_{\text{Fe}}} + \frac{1}{\alpha_i}\right)\frac{w_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{Fe}}} + \theta_a = 0{,}639\left(\frac{1}{0{,}0173} + \frac{1}{0{,}05}\right) + \frac{0{,}378}{0{,}0173} + 15 = 86^\circ\,\text{C},$$

где $\theta_a$ — средний подогрев охлаждающего воздуха $\left(\theta_a = \frac{1}{2}\Delta\theta_a\right)$

$$\theta\Delta_a = \frac{\Sigma' p}{1{,}1 V_a}.$$

Задавшись $\Delta\theta_a = 30^\circ$ C, получим потребный расход воздуха через машину

$$V_a = \frac{\Sigma' p}{1{,}1 \Delta\theta_a} = \frac{287}{1{,}1 \cdot 30} = 8{,}7 \ \textit{м}^3\textit{/сек}.$$

8. То же в лобовой части, считая $\theta_{a_{\text{л}}}$ равным нулю

$$\theta_1'' = \frac{w_{\text{Cuл}}}{k_{s\text{п}} k_{\text{л}}'}\left(\frac{1}{\alpha_{\text{л}}} + \frac{\Delta_i}{k_i}\right) = \frac{0{,}48}{3{,}71 \cdot 0{,}7}\left(\frac{1}{0{,}0055} + \frac{0{,}1}{0{,}0015}\right) = 46^\circ\,\text{C}.$$

9. Максимальное превышение температуры меди

$$\theta_{\text{Cu max}} = \theta_1' - (\theta_1' - \theta_1'')\,e^{-\frac{A}{2}l} =$$

$$= 86^\circ - (86^\circ - 46^\circ)\,e^{-0{,}03 \cdot 91{,}5} \approx 83{,}6^\circ\,\text{C},$$

где $A \approx 0{,}04 \div 0{,}06$.

10. Среднее превышение температуры меди

$$\theta_{\text{Cu ср}} = \frac{\theta_1' l + \theta_1'' l_{\text{л}}}{l + l_{\text{л}}} = \frac{86^\circ \cdot 91{,}5 + 46 \cdot 76}{170} \approx 67^\circ\,\text{C}.$$

11. Расчет температуры обмотки возбуждения.

Удельная нагрузка поверхности

$$w_{\text{п}f} = \frac{p_f}{2pS_f} = \frac{45{,}6 \cdot 10^3}{24 \cdot 6{,}25 \cdot 10^3} = 0{,}304 \ \textit{вт/см}^2.$$

При гладкой поверхности катушки

$$S_f \approx l_w h_{\text{к}} = 279 \cdot 22{,}4 = 6{,}25 \cdot 10^3 \ \textit{см}^2.$$

По рис. 63 или по уравнению

$$\alpha_f = 0{,}0028\,(1 + \sqrt{v_f}) \ \textit{вт/см}^2\,{}^\circ C,$$

$$v_f \approx 0{,}5 v_a;$$

$$\alpha_f = 0{,}0028\,(1 + \sqrt{0{,}5 \cdot 13{,}2}) = 0{,}0096 \ \textit{вт/см}^{2\circ} C.$$

Перепад на поверхности катушки

$$\theta_f - \theta_a = \frac{w_{\text{п}f}}{\alpha_f} = \frac{0{,}304}{0{,}0096} \approx 31{,}6^\circ\,\text{C};$$

при

$$\theta_a = 15^\circ\,\text{C} \quad \theta_f = 31{,}6 + 15 = 46{,}6^\circ\,\text{C}.$$

31*

Внутренним перепадом в катушке в данном случае можно пренебречь (голая полосовая медь)

$$\theta^{\circ}_{f} = \theta_{f} + 35 = 46{,}6 + 35 = 81{,}6^{\circ}\text{C},$$

т. е. катушки возбуждения имеют температуру меньше допустимой.

12. Расчет температуры компенсационной обмотки производится так же, как и для якоря. Удельная нагрузка компенсационной обмотки от потерь в меди активной части (см. выше)

$$w_{\text{пс}} = \frac{p_c l}{\pi D l 0{,}5 l_{wc} a} = \frac{2 p_c}{\pi D l_{wc} a} = \frac{2 \cdot 46{,}5 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 360 \cdot 324 \cdot 0{,}7} = 0{,}425\ \text{вт/см}^2$$

ниже, чем для якоря, поэтому расчет температуры не производим.

13. Расчет температуры добавочных полюсов.

Удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения

$$w_{\text{п.к}} = \frac{p_{\text{Cuк}}}{2 p l_{w\text{к}} h_{\text{к}}} = \frac{23{,}4 \cdot 10^3}{24 \cdot 270 \cdot 12} = 0{,}37\ \text{вт/см}^2.$$

Среднее превышение температуры

$$\theta_{\text{Cuк}} = \frac{w_{\text{п.к}}}{\alpha_{\text{п.к}}} + \theta_a = \frac{0{,}37}{0{,}0096} + 15 = 54^{\circ}\text{C}.$$

$$\alpha_{\text{п.к}} \approx \alpha_f = 0{,}0096\ \text{вт/см}^2\,{}^{\circ}\text{C}.$$

14. Температура коллектора рассчитана выше ($\theta_{\text{к}} = 50{,}6^{\circ}$C).

Данные для сравнения обоих вариантов сведены в табл. 58б.

*Таблица 58б*

**Данные двух вариантов расчета двигателя 4560 *квт***

| Данные | $D_a$ (в *см*) | $l_i$ (в *см*) | $K$ (шт.) | $\eta$ (в проц.) | $\theta_{\text{Cu ср}}$ (в град.) | $g_{\text{Cu}}$ (в *кг/квт*) | $g_{\text{Fe}}$ (в *кг/квт*) | $e_{pN}$ (в *в*) | $GD^2$ (в $T\ м^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-ый вариант | 250 | 142 | 954 | 93,25 | 57,8 | 1,56 | 3,39 | 4,2 | 56 |
| 2-ой вариант | 360 | 91,5 | 1116 | 94,1 | 67,0 | 1,72 | 2,4 | 4,7 | 160 |

Маховые моменты в таблице указаны приближенно.

Меньший расход меди в первом варианте объясняется большими удельными нагрузками, а больший расход стали получился вследствие уменьшения числа полюсов (увеличение высоты ярем и увеличение длины).

Большой перегрев во втором варианте объясняется тем, что расчет производился на самовентиляцию при номинальной скорости вращения. Поскольку данная машина работает в реверсивном режиме при наличии перегрузок, то необходима принудительная вентиляция машины при замкнутом цикле с применением охладителей. В первом варианте принято закрытое исполнение двигателя с принудительной вентиляцией. Благодаря применению лягушечьей обмотки удалось выполнить машину с меньшим диаметром.

Сравнение показателей позволяет прийти к выводу, что первый вариант является более экономичным благодаря его меньшему маховому моменту, что позволяет увеличить производительность стана.



## XII. Механический расчет (гл. 8).

1. Минимальный диаметр цапфы

$$d_{\text{ц}} = \sqrt[3]{\frac{k M_N \cdot 16}{\pi \tau_{max}}} = \sqrt[3]{\frac{2{,}8 \cdot 6{,}3 \cdot 10^6 \cdot 16}{\pi \cdot 400}} = 59\ \text{см},$$

где $k$ — кратность момента (берем $k = 2{,}8$; см. приложение X);

$\tau_{max}$ — максимально допустимое касательное напряжение (берем $\tau_{max} = 400\ \text{кг/см}^2$);

$$M_N = 97\,500 \frac{P_N}{n_N} = 97\,500 \frac{4560}{70} = 6{,}3 \cdot 10^6\ \text{кгсм}.$$

Принимаем $d_{\text{ц}} = 60$ *см*.

2. Определяем прогиб вала от веса ротора. Вес якоря определяется как сумма весов меди якорной обмотки, веса активного железа, веса коллектора и веса конструкции, на которой укреплен барабан якоря.

Вес меди якорной обмотки определен ранее $G_{\text{Cu}a} = 2000$ *кг*. Вес активного железа $G_{\text{Fe}} = G_z + G_j = 2080 + 9820 = 11\,900$ *кг*. Вес конструкции якорной звезды $G'_a$ (из чертежа) равен 6000 *кг*.

Вес коллектора

$$G_{\text{кол}} \approx \frac{\pi}{4} [D_{\text{к}}^2 - (D_{\text{к}} - 2h_{\text{к}})^2]\, l_{\text{к}} \gamma =$$

$$= \frac{\pi}{4} (248^2 - 200^2)\, 30 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 4{,}5 \cdot 10^3\ \text{кг}.$$

Вес вала

$$G_{\text{в}} \approx \frac{\pi}{4} d_{\text{ц}}^2 l_{\text{в}} \gamma = \frac{\pi}{4} 60^2 \cdot 310 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 736\ \text{кг}.$$

Общий расчетный вес якоря

$$Q = G_{\text{Cu}a} + G_{\text{Fe}} + G'_a + G_{\text{кол}} + \frac{2}{3} G_{\text{в}} =$$

$$= 2000 + 11\,900 + 6000 + 4500 + 490 = 24\,890\ \text{кг}\ (\approx 25\ т).$$

Маховой момент (приближенно)

$$GD^2 \approx \frac{1}{2}\, 25 \cdot 3{,}6^2 = 160\ \text{тм}^2.$$

Прогиб вала

$$f_Q = \frac{Q l^3}{48 E I} = \frac{24\,890 \cdot 337^3}{48 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 640\,000} = 0{,}0155\ \text{см},$$

где $l$ — расстояние между опорами, равное 337 *см*;

$$I \approx \frac{\pi d_{\text{ц}}^4}{64} = \frac{\pi \cdot 60^4}{64} = 640\,000\ \text{см}^4$$

(принимаем с запасом жесткости $d_{\text{экв}} = d_{\text{ц}}$).

3. Сила одностороннего магнитного притяжения по [1]

$$P_\delta \approx 4{,}5 \frac{e_0}{\delta} D l = 4{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 360 \cdot 86{,}5 = 14\,000\ \text{кг};$$

принимаем

$$\frac{e_0}{\delta} = \frac{\text{начальный эксцентриситет}}{\text{воздушный зазор}} \leqslant 0{,}1.$$

4. Начальный прогиб от магнитного притяжения

$$f'_1 = f_Q \frac{P_\delta}{Q} = 0{,}155 \cdot \frac{14\,000}{24\,890} = 0{,}0087\ \text{см}.$$

5. Полный начальный эксцентриситет

$$e_0 = \varepsilon + f_Q + f_P = 0{,}08 + 0{,}0155 = 0{,}0955 \text{ см},$$

где $f_P = 0$, так как $P = 0$.

6. Прогиб от магнитного притяжения

$$f_\delta = f_1' \frac{e_0}{e_0 - f_1'} = 0{,}0087 \cdot \frac{0{,}0955}{0{,}0955 \cdot 0{,}0087} = 0{,}00956 \text{ см}.$$

7. Суммарный прогиб вала

$$f = f_\delta + f_Q = 0{,}00956 + 0{,}0155 = 0{,}025 \text{ см}.$$

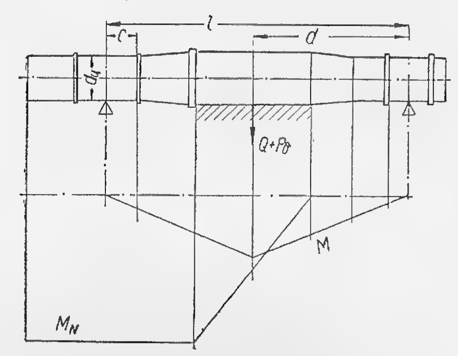



Рис. 192. К расчету прогиба вала и критической скорости.

8. Критическая скорость

$$n_{кр} = 300 \sqrt{\frac{1}{f_Q}} = 300 \sqrt{\frac{1}{0{,}0155}} = 2400 \text{ об/мин},$$

т. е. лежит далеко за пределами возможных скоростей двигателя.

9. Проверка вала по формуле сложного сопротивления по приложению X:

$$\tau_{ст} = k \frac{M_N}{W_{кр}} = \frac{2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^6}{42\,500} = 420 \text{ кг/см}^2;$$

$$W_{кр} = \frac{\pi d_ц^3}{16} = \frac{\pi \cdot 60^3}{16} = 42\,500 \text{ см}^3;$$

$$\tau_п = k \frac{M_N k_п}{W_{кр}} = 420 \text{ кг/см}^2, \text{ так как } k_п = 1;$$

$$\tau_\infty = k_\tau \tau_п + \tau_{ст} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = 1{,}3 \cdot 420 + 0{,}6 \cdot 420 = 798 \text{ кг/см}^2.$$

Коэффициент концентрации $k_\tau = 1{,}3$;

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = 0{,}6, \ \sigma_\infty = k_\sigma \frac{M_{изг}}{W_{изг}}; \ M_{изг} = \frac{Pb}{l}(l - c) +$$

$$+ (P_\delta + Q)\frac{cd}{l} \text{ (см. рис. 192)};$$

$M_{изг} = (P_\delta + Q)\frac{cd}{l} = 14\,000 + 24\,890 \frac{40 \cdot 190}{337} = 87{,}5 \cdot 10^4$, т. к. внешняя изгибающая сила $P = 0$;

$$W_{изг} = \frac{\pi d_ц^3}{32} = \frac{\pi \cdot 60^3}{32} = 21\,250; \ k_\sigma = 1{,}5 \text{ — коэффициент концентрации};$$

$$\sigma_\infty = 1{,}5 \frac{87{,}5 \cdot 10^4}{2{,}125 \cdot 10^4} = 63 \text{ кг/см}^2.$$

Комбинированное напряжение

$$\sigma_к = \sqrt{\sigma_\infty^2 + 4\tau_\infty^2} = \sqrt{63^2 + 4 \cdot 798^2} = 1610 \text{ кг/см}^2.$$

Коэффициент загрузки по отношению к пределу усталости

$$\varphi = \frac{\sigma_к}{\sigma_e} = \frac{1610}{2800} = 0{,}575 \text{ (не больше 0,6)}.$$

10. Расчет бандажей якоря по [1].

В активной части обмотка удерживается клиньями. Лобовые части укрепляются бандажами из стальной проволоки диаметром 2 *мм*.

Вес лобовых частей

$$G_л = G_{Cu} \frac{l_л}{0{,}5 l_w} = 2000 \cdot \frac{76}{170} = 895 \text{ кг}.$$

Растягивающее усилие от центробежной силы

$$G_\omega = \frac{G_л}{g} \omega_{max}^2 R_l \frac{1}{2\pi} = \frac{895}{981} 12{,}56^2 \cdot 177 \cdot \frac{1}{2\pi} = 4050 \text{ кг},$$

где

$$\omega_{max} = 2\pi n_{max} = 2\pi \frac{120}{60} = 12{,}56 \frac{1}{сек};$$

$n_{max}$ — максимальная скорость вращения, об/сек;

$R_l$ — радиус инерции лобовой части, *см*.

Напряжение от собственного веса бандажей

$$\sigma_0 = \frac{\gamma}{g} v_{max}^2 = \frac{7{,}8 \cdot 10^{-3}}{981} 2270^2 = 40{,}5 \text{ кг/см}^2,$$

где $\gamma$ — удельный вес материала бандажа, равный $7{,}8 \cdot 10^{-3}$ *кг/см²*;

$v_{max}$ — окружная скорость, *см/сек*.

Принимая для проволоки с учетом напряжения от предварительного натяга $\sigma_{max} = 2750$ *кг/см²* или 27, 5 *кг/мм²*, получим число витков на двух бандажах (с двух сторон)

$$\Sigma n_1 = \frac{4C_{(\omega)}}{\pi d^2 (\sigma_{max} - \sigma_0)} = \frac{4 \cdot 4220}{\pi \cdot 0{,}2^2 (2750 - 40{,}5)} = 50 \text{ витков},$$

где $d$ — диаметр проволоки, равный 2 *мм*.

11. Расчет напряжений в коллекторе.

Высота коллекторной пластины

$$h = k \sqrt[4]{D_к} - 1 = 2{,}8 \sqrt[4]{250} - 1 \approx 10 \text{ см},$$

где

$$k = 2{,}8 \div 2.$$

Допускаемый износ

$$\varepsilon_{кол} = 0{,}5 \sqrt[4]{D_к} = 0{,}5 \sqrt[4]{250} \approx 2 \text{ см}.$$

Длина пластины (рис. 193)

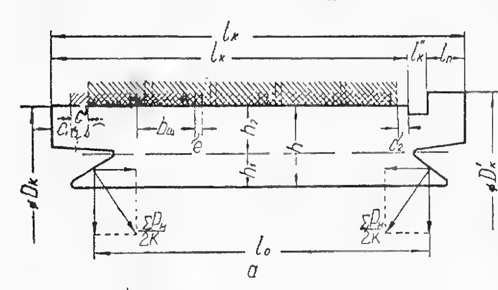
$$l_к' = l_к + l_к'' + l_п = 37{,}5 + 1 + 3 = 41{,}5 \text{ см}$$

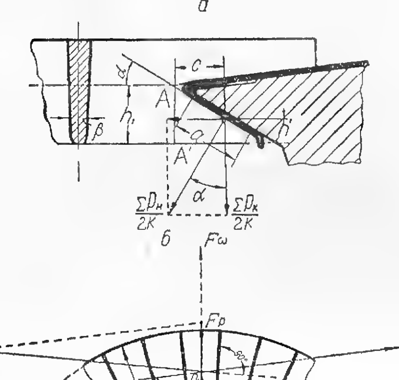
(размеры $l_к''$ и $l_п$ берутся конструктивно).

Удельное сжатие пластин

$$p = 60 + 5\left(\frac{n}{1000}\,\frac{D_к}{10}\right)^{1,5} = 60 + 5\left(\frac{120}{1000}\cdot\frac{250}{10}\right)^{1,5} = 86\ кг/см^2,$$

где $n$ выражено в об/мин, $D_к$ — в *см*.





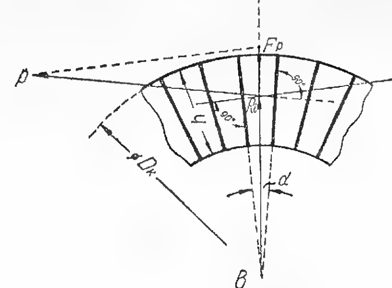


Рис. 193. К расчету коллектора:
*а* — расчет нажимных шайб; *б* — расчет пластин; *в* — сила арочного распора $F_р$ и центробежная сила $F_\omega$.

Силы арочного распора (рис. 193)

$$\Sigma F_р = 2\pi p S_п = 2\pi\cdot 84,7\cdot 415 = 220\,000\ кг,$$

где

$$S_п = h l'_к = 10\cdot 41,5 = 415\ см^2.$$

Центробежные силы

$$\Sigma F_\infty = \frac{G'_к}{g}\,\omega^2_{max} R'_i = \frac{4500}{981}\cdot 12,5^2\cdot 119 = 53\,500\ кг,$$

где $\omega_{max} = 2\pi\frac{120}{60} = 12,5\ \frac{1}{сек}$; $R'_i = 119$ *см*.

Напряжение на растяжение шайб

$$\sigma_ш = \frac{\Sigma F_\infty + \Sigma F_p}{2\pi S_ш};$$

$$\sigma_{ш.\ доп} < 2500\ кг/см^2.$$

Сечение шайб

$$S_ш = \frac{\Sigma F_\infty + \Sigma F_p}{2\pi\sigma_ш} = \frac{53\,500\cdot 220\,000}{2\pi\cdot 2200} = 19,8\ см^2.$$

Напряжение в стяжных болтах

$$\sigma_б = \frac{\Sigma F_s}{mq_б} = \frac{0,5\,(\Sigma F_\infty + \Sigma F_p)\,\mathrm{tg}\,\alpha}{mq_б},$$

откуда, принимая $\sigma_{б.\ доп} = 2000\ кг/см^2$ для Ст. 3 и $\alpha = 30°$, получим

$$mq_б = \frac{0,5\,(\Sigma F_\infty + \Sigma F_p)\,\mathrm{tg}\,\alpha}{\sigma_б} = \frac{0,5\cdot 273\,500}{2000}\cdot 0,58 = 40.$$

Выбираем болт диаметром 2 *см* $\left(q_б = \frac{\pi d^2}{4} = 3,14\ см^2\right)$.

Допустимое число болтов

$$m = \frac{40}{3,14} \approx 12,7.$$

Из конструктивных соображений и для увеличения надежности принимаем 24 болта.



Действительное напряжение в болтах

$$\sigma_б = \frac{0,5\cdot 273\,500\cdot 0,58}{24\cdot 3,14} = 1050\ кг/см^2,$$

что обеспечивает необходимый запас прочности.

Напряжения в хвостах пластин (рис. 193):
на изгиб в сечении $A' - A$

$$\sigma_q = \frac{M_{изг}}{W_{изг}} = \frac{270}{1,93} = 140\ кг/см^2,$$

где $M_{изг} = \frac{\Sigma F_\infty + \Sigma F_p}{2K}\,c = \frac{53\,500 + 220\,000}{2\cdot 1116}\cdot 2,2 = 270$ *кгсм*; $c = 2,2$ *см*; $h_1 = 4,5$ *см*; $\beta' = 0,57$ *см*;

$$W_{изг} = \frac{1}{6}\,\beta' h_1^2 = \frac{1}{6}\cdot 0,57\cdot 4,5^2 = 1,93\ см^3.$$

Размеры $c$, $h_1$, $\beta'$ определяются по конструктивным чертежам, рис. 193.

Напряжение от изгиба в середине пластины

$$\sigma_п = \frac{\Sigma F_\omega + \Sigma F_p}{W_{изг}}\,\frac{l_0}{8K} = \frac{273\,500\cdot 35}{1,93\cdot 8\cdot 1116} = 555\ кг/см^2 < \sigma_{п.\ доп} = 1800\ кг/см^2.$$

Напряжение смятия в миканитовых манжетах

$$\sigma_м = \frac{\Sigma F_\omega + \Sigma F_p}{2K\cdot a\cdot\beta'\cos\alpha} = \frac{273\,500}{2\cdot 1116\cdot 4,4\cdot 0,57\cdot 0,805} = 57\ кг/см^2 < \sigma_{м.\ доп} = 500\ кг/см^2$$

(размер $a$ определяется по конструктивному чертежу, рис. 193).

12. Проверка станины статора на жесткость

$$I \geqslant \frac{0,58 D^2 l R_н^2}{E},$$

где $D$ — диаметр якоря, *см*;
$l$ — длина железа якоря, *см*;
$R_н$ — радиус по нейтральному слою станины, *см*;
$E$ — модуль упругости; для чугуна $E = 0,85\cdot 10^6\ кг/см^2$; для стали $E = 2,1\cdot 10^6\ кг/см^2$.

Таким образом, получаем, что момент инерции сечения станины должен быть

$$I \geqslant \frac{0,58\cdot 360^2\cdot 94\,(195,7)^2}{2,1\cdot 10^6} = 132\,000\ см^4.$$

13. Расчет подшипников.
Нагрузка на проекцию цапфы

$$\frac{G}{d_ц l_ц} = \frac{40\,000}{60\cdot 80} = 6\ кг/см^2,$$

$$G_1 = (G + P_\delta)\,\frac{l - d}{d} = 38\,890\,\frac{147}{110} = 30\,000\ кг\ на\ одну\ цапфу.$$

Размеры $l_ц$ и $l$ берутся из конструктивного чертежа вала (рис. 192).

Расчетная угловая скорость $\omega = 2\pi\frac{70}{60} = 7,32\ \frac{1}{сек}$.

Коэффициент трения

$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda\omega c_\mu}{P_ц \cdot 10^4}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}006 \cdot 7{,}32}{8{,}3 \cdot 10^4}} = 0{,}174 \cdot 10^{-2},$$

где $\lambda$ для моторного масла марки $M$ — по кривым рис. 46;

$$c_\mu = \sqrt{\frac{4d_ц + l_ц}{l_ц}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 60 + 80}{80}} = 2.$$

Минимальный зазор (толщина смазочного слоя)

$$h_0 = 0{,}25\psi d_ц \text{ (рис. 45,} в),$$

где

$$\psi = \mu \sqrt{\frac{l_ц^2}{(d_ц + l_ц)(4d_ц + l_ц)}} = 0{,}174 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{80^2}{(60+80)(4\cdot 60+80)}} = 0{,}066 \cdot 10^{-2}.$$

Абсолютный зазор

$$\delta = \psi d_ц = 0{,}066 \cdot 10^{-2} \cdot 60 = 0{,}0398 \; см \; (\approx 0{,}4 \; мм).$$

Тогда

$$h_0 = 0{,}25\delta \approx 0{,}1 \; мм.$$

Согласно [1] $h_0$ должно быть порядка 0,2 *мм* при жесткой посадке вкладыша и $h_0 = 0{,}02$ *мм* при самоустанавливающейся посадке вкладыша.

14. Потери в подшипниках при расчетной скорости

$p_{т1} = 9{,}81\, G_1 \mu v_ц = 9{,}81 \cdot 30\,000 \cdot 0{,}206 \cdot 10^{-2} \cdot 2{,}21 = 1370$ *вт* (на одну цапфу), где $v_ц$ — скорость, *м/сек*; при номинальном режиме

$$v_ц = \frac{\pi d_ц n}{100} = \frac{\pi 60 \cdot 70}{100 \cdot 60} = 2{,}21 \; м/сек.$$

$$p_т \approx 2p_{т1}.$$

15. Расход масла при номинальном режиме (70 об/мин)

$$V_м = \frac{p_т}{1700\,\theta_м} \; л/сек.$$

Задаваясь повышением температуры масла $\theta_м = 15°C$, получим требуемый расход масла

$$V_м = \frac{2740}{1700 \cdot 15} = 0{,}107 \; л/сек \; (6{,}4 \; л/мин).$$

Подсасываемое количество масла между поверхностями

$$V'_м \approx 6 \cdot 10^{-4} n l_ц d_ц^2 \psi \; л/сек = 6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{70}{60} \cdot 80 \cdot 60^2 \cdot 0{,}066 \cdot 10^{-2} = 0{,}13 \; л/сек, \text{ т. е. } V'_м > V_м.$$

Нагрев масла в рабочем слое

$$\theta'_м = \frac{c_\mu p_т}{1700 V'_м} = \frac{2 \cdot 2740}{1700 \cdot 0{,}13} = 25°C.$$

Среднее превышение температуры масла

$$\theta_{м.\,ср} = \frac{p_т}{1700 V'_м} = 0{,}5 \cdot 25 = 12{,}5.$$

Проверка загрузки подшипника

$$\sqrt{p_ц v_ц^3} = \sqrt{8{,}3 \cdot 2{,}21^3} = 9{,}5.$$



Согласно гл. 8 при $\sqrt{p_ц v_ц^3} = 6 \div 50$ допускается кольцевая смазка, но, учитывая реверсивность двигателя, необходимо применить циркуляционную смазку.

16. Расчет крепления главных полюсов.

На главный полюс действуют следующие силы (рис. 194):

а) вес полюса $G_m + G_{Cu\,f}$,

б) силы магнитного притяжения к якорю и ярму,

в) тангенциальная сила $p_t$, создаваемая вращающим моментом двигателя $M$.

Весом полюсов у малых и средних машин можно пренебречь, но у крупных машин величина $G_m + G_{Cu\,f}$ достигает значений, которыми пренебрегать не следует. Силы магнитного притяжения полюса к якорю и ярму не равны. Сила магнитного притяжения к ярму больше, чем сила магнитного притяжения к якорю, и при расчете болтов их можно не учитывать. Тангенциальную силу $P_t$ можно разложить на пару сил и тангенциальную силу, приложенную в точке $B$, равную $P_t$. Под действием этих сил полюс будет поворачиваться вокруг точки $A$ и сдвигаться по окружности. Крепежные болты должны создать натяг $P_б$, компенсирующий все действующие на полюс силы

$$\Sigma P_б = \Sigma P'_б + \Sigma P''_б + G_m + G_{Cuf}.$$

$\Sigma P'_б$ — сумма сил затяжки всех болтов одного полюса, уравновешивающая момент полюса по отношению к точке $A$ и определяющаяся из равенства моментов

$$P_t h_m = \frac{b_m}{2} \Sigma P'_б.$$

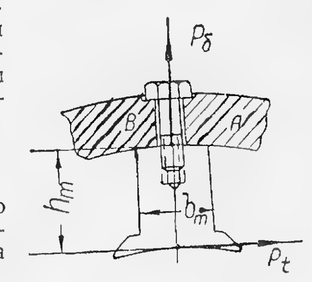



Рис. 194. К расчету сил, действующих на полюс.

Величина силы $P_t$ определяется из условий максимального момента

$$M_{max} = kM_N = k \cdot 97\,500 \frac{P}{n} \; кг/см,$$

$$P_t = \frac{M_{max}}{2p\frac{D}{2}} = \frac{M_{max}}{pD} = \frac{2{,}8 \cdot 97\,500 \cdot 4560}{70 \cdot 12 \cdot 360} = 4120 \; кг;$$

$$\sum P'_б = \frac{2P_t h_m}{b_m} = 2 \cdot 4120 \frac{28}{26} = 8850 \; кг,$$

где $k$ — максимальная кратность момента, равная 2,8;

$P$ — мощность, *квт*;

$n$ — скорость вращения, об/мин;

$\Sigma P''_б$ — сумма сил затяжки всех болтов одного полюса, создающая силу трения между полюсом и ярмом, равную силе сдвига $P_t$:

$$\sum P''_б = \frac{P_t}{0{,}2} = \frac{4120}{0{,}2} = 20\,600 \; кг,$$

где 0,2 — коэффициент трения между полюсом и ярмом.

Вес обмотки главного полюса (на один полюс)

$$G'_{Cu\,f} = \frac{2900}{24} = 121 \; кг.$$

Вес стали полюса $G_m = h_m b_m l_m \gamma_{Fe} = 28 \cdot 26 \cdot 95 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 540$ *кг*,

$$G_m + G'_{Cu\,f} = 540 + 121 \approx 660 \; кг,$$

$$\Sigma P_б = 8850 + 20\,600 + 660 = 30\,110 \; кг.$$

Для стали марки Ст. 5 допустимое напряжение на разрыв не должно превышать $\sigma = 2000$ *кг/см²*.

При четырех крепежных болтах сечение болта

$$q_б = \frac{\Sigma P_б}{n_б \sigma} = \frac{30\,110}{4 \cdot 2000} = 3,78 \text{ см}^2.$$

Внутренний диаметр болта (по внутреннему сечению резьбы)

$$d_б = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 3,78} = 2,2 \text{ см}.$$

## *Пример 3*

### Расчет генератора

#### I. Задание

Рассчитать генератор для питания электродвигателя индивидуального привода валков блуминга 1150. Мощность генератора 5000 *квт*, напряжение 865 *в*, 500 об/мин. Возбуждение независимое, 110 *в*.

Перегрузочная способность генератора должна соответствовать перегрузочной способности двигателя.

В режиме рекуперативного торможения возможно повышение напряжения на генераторе на 20% сверх номинального. Исполнение генератора закрытое с принудительной вентиляцией.

Ток якоря

$$I = \frac{P10^3}{U} = \frac{5000 \cdot 10^3}{865} = 5780 \text{ а}.$$

#### II. Определение основных размеров и параметров якоря (§ 10-2)

1. Диаметр и длина якоря. При выборе диаметра якоря генератора целесообразно в отличие от двигателя стремиться к возможно большему диаметру, так как это облегчает условия коммутации, если при этом рост диаметра якоря не влечет за собой чрезмерного увеличения скорости коллектора (более 35 *м/сек*).

В данном конкретном примере мощность 5000 *квт* в одном якоре для скорости вращения 500 об/мин является предельной. Поэтому максимально возможный диаметр якоря находим по максимальной скорости вращения. Воспользовавшись уравнением (20), получаем $D_{max} = 245$ *см*. Принимаем ближайший меньший диаметр якоря $D = 215$ *см*.

Для ориентировочной проверки возможности выполнения генератора в выбранном диаметре якоря воспользуемся рис. 173: для $\frac{P}{n} = \frac{5000}{500} = 10$ *квт/об/мин* $C_A' = 18,2 \cdot 10^4$.

Длина якоря

$$l = \frac{5000 \cdot 18,2 \cdot 10^4}{215^2 \cdot 500} = 39,3 \text{ см}.$$

По рис. 174 получаем $n_{max} = 500$ об/мин. Следовательно, в первом приближении генератор выполним в этом диаметре якоря. Окончательно это можно решить после расчета реактивной э. д. с.

2. Окружная скорость якоря

$$v_a = \pi D n = \frac{\pi 2,15 \cdot 500}{60} = 56,3 \text{ м/сек}.$$

3. Число полюсов. Согласно табл. 48 выбираем $\tau \approx 70$ *см* и получаем $2p = \frac{\pi D}{\tau} \approx 10$. Принимаем $2p = 10$.



4. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 215}{10} = 67,5 \text{ см}.$$

5. Частота перемагничивания

$$f = pn = \frac{5 \cdot 500}{60} = 41,7 \text{ гц}.$$

Так как число полюсов мало, можно было бы для повышения использования якоря принять $\alpha = 0,75$. Однако, имея в виду применение трехходовой обмотки Латура-Перре, которая имеет довольно большую ширину зоны коммутации из-за укорочения равного целому пазу и поэтому требует большой ширины нейтральной зоны, применяем $\alpha = 0,72$.

7. Длина полюсной дуги

$$b_p = \alpha\tau = 0,72 \cdot 67,5 = 48,6 \text{ см},$$

8. Длина расчетной полюсной дуги

$$b_i = b_p + 2\delta = 48,6 + 0,7 \cdot 2 = 50 \text{ см},$$

где $\delta$ — воздушный зазор под главным полюсом, принятый согласно табл. 57 равным 7 *мм*.

9. Полюсное перекрытие

$$\alpha_i = \frac{b_i}{\tau} = \frac{50}{67,5} = 0,74.$$

#### III. Обмотка якоря (§ 10-4)

1. Выбор обмотки якоря. Если исходить из величины тока параллельной ветви, то, как и в предыдущем примере, можно применить двухходовую лягушечью обмотку.

Действительно,

$$2a_1 = 2 \cdot 2p = 20; \; i_{a1} = \frac{I}{2a_1} = \frac{5780}{20} = 289 \text{ а}.$$

Ток в каждой из составляющих обмоток

$$2a = 2 \cdot 2a_1; \; i_a = \frac{289}{2} = 144,5 \text{ а}.$$

Однако, если учесть, что величина линейной нагрузки для быстроходных машин такого типа по условиям коммутации обычно не превосходит 450 *а/см*, то необходимо проверить величину междуламельного напряжения

$$\varepsilon_к = \frac{4pUi_{a1}}{\pi DA} = \frac{20 \cdot 865 \cdot 289}{\pi \cdot 215 \cdot 450} = 16,4 \text{ в}.$$

С учетом 20% повышения напряжения при рекуперации получим

$$\varepsilon_к' = 1,2\,\varepsilon_к = 1,2 \cdot 16,4 = 19,2 \text{ в}.$$

Полученные значения $\varepsilon_к$ и $\varepsilon_к'$ неприемлемы. Для таких крупных быстроходных машин $\varepsilon_к$ не должна превосходить 15 *в*. Поэтому двухходовая обмотка не может быть применена. Для уменьшения междуламельного напряжения нужно увеличить число ходов обмотки, т. е. сделать трехходовую обмотку. Трехходовую обмотку целесообразно выполнить по типу обмотки Латура-Перре, которая обладает более конструктивной и технологической формой секции и лучшим заполнением паза по высоте, а следовательно, большей надежностью и меньшим расходом изоляции (см. приложение IV).

Число параллельных ветвей трехходовой обмотки

$$2a = 3 \cdot 2p \cdot 2 = 60; \; (2a_1 = 30).$$

В дальнейшем будем рассматривать лягушечью обмотку как петлевую с двумя параллельными проводниками, т. е. примем $2a_1 = 6p$.

2. Ток параллельной ветви

$$i_{a1} = \frac{I}{6p} = \frac{5780}{30} = 192\ a;\ i_a = 96\ a.$$

3. Число активных проводников обмотки якоря (ориентировочно)

$$N_1 = \frac{\pi DA}{i_{a1}} = \frac{\pi 215 \cdot 450}{192} = 1580.$$

### IV. Уточнение длины якоря (§ 10-5)

1. Поток якоря (приближенно)

$$\Phi = \frac{E \cdot 60}{N_1 \frac{p}{a_1} n_N} = \frac{882 \cdot 60}{1580 \cdot \frac{1}{3} \cdot 500} = 0{,}2\ вб,$$

где

$$E = U + \Delta U = 865 + 17 = 882\ в;\ \Delta U = 0{,}02 \cdot 865 = 17\ в.$$

2. Расчетная длина якоря. Принимаем $B_\delta = 10\,300\ гс$. Тогда

$$l_i = \frac{\Phi}{b_i B_\delta} = \frac{0{,}2 \cdot 10^8}{50 \cdot 10\,300} = 38{,}8\ см.$$

3. Конструктивная длина якоря $l = l_i + n_s b_s''$,
где $b_s'' = 0{,}222\ см$ (§ 3-2) при ширине канала $b_s = 1\ см$.

Задаваясь шириной пакета 6 *см*, получим число пакетов и каналов якоря

$$n' = \frac{39}{6} \approx 6;\ n_s = n' - 1 = 5.$$

При этом

$$l = 38{,}8 + 5 \cdot 0{,}222 = 39{,}91\ см.$$

Принимаем

$$l = 40\ см.$$

Уточняем ширину пакета

$$l' = \frac{l - n_s b_s}{n'} = \frac{40 - 5 \cdot 1}{6} = 5{,}83\ см$$

(два крайних пакета — по одному с каждой стороны — делаем по 6,5 *см*, а внутренние пакеты — по 5,5 *см*).

Уточняем расчетную длину якоря

$$li = 40 - 0{,}222 \cdot 5 = \mathbf{38{,}9}\ \textbf{см}.$$

4. Длина пакетов и чистого железа якоря

$$l_1 = l - n_s b_s = 40 - 5 \cdot 1 = \mathbf{35}\ \textbf{см};$$
$$l_{Fe} = l_1 k_п = 35 \cdot 0{,}93 = \mathbf{32{,}6}\ \textbf{см}.$$

### V. Число пазов якоря (§ 10-4, § 10-5)

1. Для определения числа пазов якоря $Z$ необходимо решить вопрос о числе сторон секции одного слоя в пазу $u$. Трехходовая лягушечья обмотка Латура-Перре, как известно, выполнима при значениях $u = 1,2$ или 4. Исходя из того, что вариант с $u = 4$ обладает лучшим заполнением паза, мы и выясним вначале возможность его применения.

Объем тока в пазу

$$2ui_{a1} = 2 \cdot 4 \cdot 192 = 1535\ a.$$

Предварительное число пазов и зубцовое деление

$$Z = \frac{N_1}{2u} = \frac{1580}{2 \cdot 4} \approx 198;$$

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi\, 215}{198} = 3{,}41\ см.$$



Из рассмотрения полученных величин видно, что вариант с $u = 4$ вполне приемлем как по величине объема тока к пазу, так и по величине зубцового деления.

Число пазов на полюс $\frac{Z}{2p} = \frac{198}{10} = 19{,}8$. Так как в данном случае $Z/2p$ должно быть целым, то принимаем $Z/2p = 20$, а следовательно,

$$Z = \mathbf{200}.$$

2. Уточняем число активных проводников якоря и величину линейной нагрузки

$$N_1 = 2uZ = 2 \cdot 4 \cdot 200 = 1600,$$

$$A = \frac{N_1 i_{a1}}{\pi D} = \frac{1600 \cdot 192}{\pi \cdot 215} = \mathbf{455}\ \boldsymbol{a/см}.$$

### VI. Коллектор (§ 10-4, § 10-8)

1. Число коллекторных пластин

$$K = Zu = 200 \cdot 4 = 800.$$

2. Диаметр коллектора. В быстроходных машинах максимально допустимый диаметр коллектора определяется, исходя из максимальной окружной скорости коллектора, которая при обычной конструкции коллекторов не должна превышать 35 *м/сек*:

$$D_{к\ max} = \frac{v_{к\ max}}{\pi n_N} = \frac{35 \cdot 60 \cdot 10^2}{\pi \cdot 500} = 134\ см;$$

$$t_{к\ max} = \frac{\pi D_{к\ max}}{K} = \frac{\pi \cdot 134}{800} = 0{,}526\ см.$$

Полученная величина $t_{к\ max}$ находится на пределе минимально допустимой величины коллекторного деления для крупных быстроходных машин, а следовательно, максимальный диаметр коллектора, выбранный по окружной скорости, одновременно является и минимальным по величине коллекторного деления. Принимаем ближайший нормализованный диаметр коллектора

$$D_к = \mathbf{130}\ \textbf{см}.$$

3. Коллекторное деление

$$t_к = \frac{\pi D_к}{K} = \frac{\pi \cdot 130}{800} = \mathbf{0{,}51}\ \textbf{см}.$$

Толщина междуламельной изоляции $\beta_i = \mathbf{0{,}1}$ ***см***, толщина пластины $\beta_к = \mathbf{0{,}41}$ ***см***.

### VII. Уточнение обмоточных данных и размеры паза (§ 10-5)

1. Определяем ориентировочно высоту паза $h_п \approx \lambda_1 \tau$; $\lambda_1 = 0{,}07 - 0{,}1$; или

$$h_п = \frac{A}{\lambda \varphi_{Cu} s_a} = \frac{455}{0{,}45 \cdot 0{,}35 \cdot 600} = 4{,}8\ см.$$

Учитывая принудительную вентиляцию и относительно небольшую линейную нагрузку, можно принять верхний предел плотности тока для крупных машин постоянного тока $s_a = 6{,}0\ a/мм^2$.

2. Согласно приложению IV толщина изоляции по высоте для обмотки Латура-Перре составляет $\Delta h = 10{,}2\ мм$. Для меди остается $48 - 10{,}2 - 5 = 32{,}8\ мм$ (высоту клина принимаем 0,5 *см*). Следовательно, высота одного проводника

$$h = \frac{32{,}8}{4} = 8{,}2\ мм.$$

Требуемое сечение меди

$$q_{Cu} = \frac{i_{a1}}{2s_a} = \frac{192}{12} = 16\ мм^2.$$

Предварительная толщина обмоточной меди

$$b = \frac{q_{\text{Cu}}}{h} = \frac{16}{8,2} = 1,95 \text{ мм}.$$

Выбираем стандартную обмоточную медь по ГОСТ 434-41 с размерами $b \times h = \mathbf{1,95 \times 8 = 15,4}$ **мм²**.

3. Уточняем плотность тока в обмотке якоря и тепловую нагрузку

$$s_a = \frac{192}{15,4 \cdot 2} = \mathbf{6,24\ a/мм^2}; \quad As_a = 455 \cdot 6,24 = \mathbf{2840}.$$

4. Уточняем размеры паза. Изоляцию паза берем по приложению IV. Размеры паза «в свету»:

$$b_{\text{п}} = bu + \Delta b = 1,95 \cdot 4 + 4,8 = 12,6 \text{ мм};$$

$$h_{\text{п}} = hu + \Delta h + h_{\text{к}} = 8 \cdot 4 + 10,2 + 5 = 47,2 \text{ мм}.$$

Округляя, получим $b_{\text{п}} \times h_{\text{п}} = \mathbf{12,6 \times 48}$ **мм**.

Размеры паза в штампе

$$b'_{\text{п}} \times h_{\text{п}} = (b_{\text{п}} + \Delta ш) \times h_{\text{п}} = (12,6 + 0,56) \times 48 = 13,16 \times 48 \text{ мм}.$$

5. Проверка выбранных размеров паза из условий максимально допустимой индукции в корне зубца.

Зубцовое деление по дну пазов

$$t_{z3} = \frac{\pi (D - 2h_{\text{п}})}{Z} = \frac{\pi (215 - 2 \cdot 4,8)}{200} = 3,22 \text{ см}.$$

Ширина зубца в корне

$$b_{z3} = t_{z3} - b'_{\text{п}} = 3,22 - 1,316 = 1,904 \text{ см}.$$

Сечение зубцов на полюс по дну пазов

$$Q_{z3} = \frac{Z}{2p} \alpha_i b_{z3} l_{\text{Fe}} = 20 \cdot 0,74 \cdot 1,904 \cdot 32,6 = 920 \text{ см}^2.$$

Индукция в корне зубца

$$B_{z3} = \frac{\Phi}{Q_{z3}} = \frac{20 \cdot 10^6}{920} = 21\,800 \text{ гс}.$$

Полученную величину $B_{z3}$, учитывая $f = 41,7$ *гц*, можно считать допустимой и достаточной.

Дальнейший расчет может быть произведен аналогично предыдущему примеру расчета двигателя. При этом необходимо иметь в виду следующие особенности:

а) при выборе внутреннего диаметра якоря индукция в спинке не должна превышать 14 000 *гс* из-за относительно высокой частоты перемагничивания;

б) учитывая тяжелые условия коммутации, станину генератора целесообразно выполнить шихтованной. При этом величина индукции в ней может быть принята около 13 000 *гс*.

6. Расчет шагов обмотки якоря.

Петлевая обмотка:

шаг по коллектору

$$y_{\text{к}} = \underset{(-)}{+} m = 3$$

(взят знак «+», т. к. обмотка неперекрещенная);

первый частичный шаг (обмотка принята с укорочением)

$$y_1 = \frac{Z}{2p} u \overset{(+)}{-} \varepsilon = \frac{200}{10} \cdot 4 - 4 = 76;$$

второй частичный шаг и шаг по пазам

$$y_2 = y_1 - y_{\text{к}} = 76 - 3 = 73; \quad y_{\text{п}} = \frac{y_1}{u} = \frac{76}{4} = 19.$$



Волновая обмотка:

шаг по коллектору

$$y'_{\text{к}} = \frac{K \overset{-}{(+)} a_1}{p} = \frac{800 - 15}{5} = 157$$

(взят знак «—», т. к. обмотка неперекрещенная);

первый и второй частичные шаги

$$y'_1 = y_1 = 76 \quad \text{и} \quad y'_2 = y'_{\text{к}} - y'_1 = 157 - 76 = 81;$$

шаг по пазам

$$y'_{\text{п}} = y_{\text{п}} = 19.$$

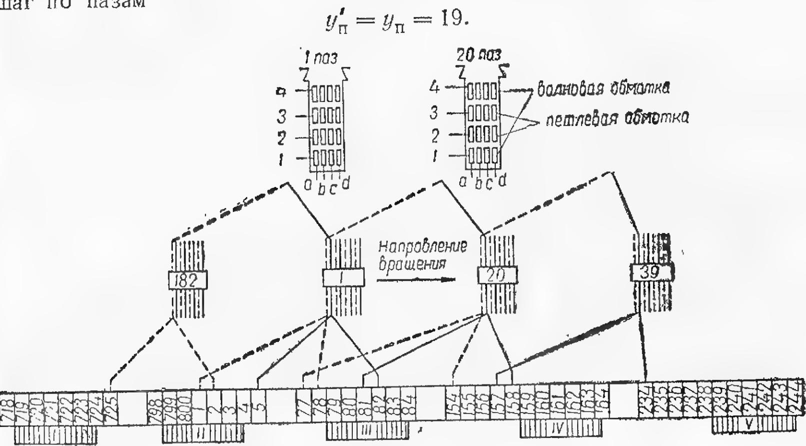



Рис. 195. Схема лягушечьей обмотки Латура-Перре.

Проверка выполнимости необходимых условий:

$$\frac{K}{p} = \frac{800}{5} = 160; \quad y_{\text{к}} + y'_{\text{к}} = 3 + 157 = 160 = \frac{K}{p}.$$

Схема обмотки якоря приведена на рис. 195.

## VIII. Коммутация (§ 10-8)

1. Определение размеров щетки.

Ширина междуполюсной зоны

$$c_{\text{р}} = \tau - b_{\text{р}} = 67,5 - 48,6 = 18,9 \text{ см}.$$

Максимальная ширина щетки (см. XV расчета двигателя)

$$b_{\text{щ max}} = 0,5 c_{\text{р}} \frac{D_{\text{к}}}{D} - \left(u - \frac{a_1}{p} + \varepsilon\right) t_{\text{к}} = 0,5 \cdot 18,9 \cdot \frac{130}{215} - \left(4 - \frac{15}{5} + 4\right) \times$$

$$\times\, 0,51 = 3,15 \text{ см}.$$

Выберем, как и для двигателя, наклонные щеткодержатели с углами наклона щеток 10° и 30° и двойные щетки марки ЭГ-4 с размерами $b_{\text{щ1}} \times l_{\text{щ}} = 12,5 \times 32$.

Ширина соприкосновения двойной щетки с коллектором с учетом наклона

$$b'_{\text{щ}} = \frac{b_{\text{щ1}}}{\cos 10^\circ} + \frac{b_{\text{щ1}}}{\cos 30^\circ} = \frac{12,5}{\cos 10^\circ} + \frac{12,5}{\cos 30^\circ} = 27,2 \text{ мм}.$$

Площадь двойной щетки с учетом наклона

$$S_{\text{щ}} = b'_{\text{щ}} l_{\text{щ}} = 27,2 \cdot 32 \cdot 10^{-2} = 8,7 \text{ см}^2.$$

2. Число щеток на один болт, принимая предварительно плотность тока при номинальной нагрузке $s_{щ} = 8\ a/см^2$,

$$n_{щ} = \frac{2I}{2ps_{щ} S_{щ}} = \frac{2 \cdot 5780}{10 \cdot 8 \cdot 8{,}7} = 16{,}55.$$

Принимаем

$$n_{щ} = 16.$$

3. Активная длина коллектора

$$l_к = n_{щ}(l_{щ} + 0{,}8) = 16\,(3{,}2 + 0{,}8) = 64\ см.$$

Конструкция одинарного коллектора с активной длиной 64 *см* трудновыполнима и влечет за собой большой расход меди, поэтому принимаем двойной коллектор с числом щеток на каждом, равным 8.

4. Полная ширина щетки и ширина коммутационной зоны

$$b_{щ} = b'_{щ} + 1{,}5 = 27{,}2 + 1{,}5 = 28{,}7\ мм,$$

где 1,5 *мм* — расстояние между щетками (см. рис. 187). Щеточное перекрытие

$$\beta = \frac{b_{щ}}{t_к} = \frac{28{,}7}{5{,}1} = 5{,}62.$$

Ширина коммутационной зоны

$$b_{к.\,з} = \left(\beta + u - \frac{a_1}{p} + \varepsilon\right) t_к \frac{D}{D_к} = \left(5{,}62 + 4 - \frac{15}{5} + 4\right) \cdot 0{,}51 \cdot \frac{215}{130} = 8{,}94\ см.$$

Отношение ширины зоны коммутации к междуполюсному промежутку

$$\beta_н = \frac{b_{к.\,з}}{c_p} 100 = \frac{8{,}94}{18{,}9} \cdot 100 = 47{,}5\%.$$

5. Расчет реактивной э. д. с.

Магнитная проводимость паза

$$\lambda_п = \frac{\frac{h_1}{3} + h_0}{b'_п} = \frac{\frac{38}{3} + 7{,}25}{13{,}16} = 1{,}512.$$

Магнитная проводимость по коронкам зубцов, если предварительно принять $\delta'_к = 3\ см$,

$$\lambda_к = \frac{b_{z1}}{2\delta'_к} + 0{,}3 = \frac{2{,}064}{2 \cdot 3} + 0{,}3 = 0{,}645.$$

Реактивная э. д. с.

$$e_р = 2vAl_1 w_s \cdot \zeta = 2 \cdot 56{,}3 \cdot 10^2 \cdot 455 \cdot 35 \cdot 1 \cdot 3{,}86 \cdot 10^{-8} = 7\ в,$$

где

$$\zeta = 0{,}4\pi 10^{-8}\left[(\lambda_п + \lambda_к)\frac{2u'}{\beta} + \lambda_л \frac{l_л}{l_1}\right] =$$

$$= 1{,}26 \cdot 10^{-8}\left[(1{,}512 + 0{,}645)\frac{4{,}5}{5{,}62} + 0{,}5\frac{94}{35}\right] = 3{,}86 \cdot 10^{-8};$$

$\beta = 5{,}62$; $u = 4$; $\varepsilon = 4$; по табл. 53 $u' = 2{,}25$; $l_л \approx 1{,}4\tau = 1{,}4 \cdot 67{,}5 = 94\ см.$

Величина реактивной э. д. с. при перегрузках:

$$e_{р\,max} = 2{,}5e_р = 2{,}5 \cdot 7 = 17{,}5\ в;\quad e_{р.\,отк} = 2{,}75e_р = 2{,}75 \cdot 7 = 19{,}2\ в.$$

Полученные величины реактивной э. д. с. при перегрузках имеют предельные значения. Учитывая применение шихтованной станины, что значительно улучшает условия при перегрузках, можно считать их допустимыми.



6. Уточнение воздушного зазора под добавочными полюсами.

Так как расчеты компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов не проводились, то определим вначале отношение $\vartheta = \dfrac{F_c + F_к}{F_a}$.

Магнитодвижущая сила якоря на полюс

$$F_a = \frac{\tau}{2} A = \frac{67{,}5}{2} \cdot 455 = 15\,350\ а.$$

Исходя из того, что $\vartheta$ должно быть в пределах 1,2—1,35, найдем максимальное и минимальное общее число витков компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов:

$$\Sigma w_{min} = \frac{1{,}2F_a}{I} = \frac{1{,}2 \cdot 15\,350}{5780} = 3{,}2;\quad \Sigma w_{max} = \frac{1{,}35F_a}{I} = \frac{1{,}35 \cdot 15350}{5780} = 3{,}6.$$

Принимаем $\Sigma w = 3{,}5$ (выполняется в 2 параллельные группы).

Тогда

$$\vartheta = \frac{\Sigma wI}{F_a} = \frac{3{,}5 \cdot 5780}{15\,350} = 1{,}315.$$

По (69)

$$\delta_к = \frac{(\vartheta - 1)\,D \cdot 10^{-8}}{\zeta p} = \frac{0{,}315 \cdot 215 \cdot 10^{-8}}{3{,}86 \cdot 10^{-8} \cdot 5} = 3{,}5\ см.$$

Принимаем $\delta_к = 3{,}6\ см$; зазор между якорем и полюсным наконечником $\delta'_к = 3\ см$, регулируемый зазор между полюсом и ярмом $\delta''_к = 0{,}6\ см$.

Дальнейший расчет может быть произведен, руководствуясь общей методикой и примерами 1 и 2.

## *Пример 4*

### Расчет двигателя

### I. Задание

Рассчитать двигатель параллельного возбуждения $P = 100\ квт$, $U = 440\ в$ с широким регулированием числа оборотов $n = 300 - 1200$ об/мин (1 : 4).

Регулирование должно осуществляться изменением поля возбуждения при постоянной мощности. Исполнение машины защищенное с самовентиляцией (приводится сокращенный расчет).

### II. Определение основных размеров и параметров якоря (§ 10-2)

1. Диаметр якоря. Определение диаметра и длины якоря в данном примере связано не только с выбором магнитных и электрических нагрузок машины, но также с недопустимыми междуламельными перенапряжениями, которые вызываются сильным искажением поля от действия реакции якоря при максимальных оборотах, когда поток резко ослаблен. Эти перенапряжения опасны, т. к. приводят к явлению «кругового огня» на коллекторе. Применение компенсационной обмотки устраняет искажение поля, но связано с некоторым осложнением конструкции машины. Отказ от компенсационной обмотки, как это будет показано ниже, приводит к еще большим осложнениям — резкому росту габаритов машины и к различного рода другим трудностям, значительно снижающим надежность проектируемой машины. Поэтому в качестве основного варианта для расчета примем машину с компенсационной обмоткой. Для предварительного выбора диаметра воспользуемся методом универсальной машинной постоянной, приняв для расчета $n_N = 300$ об/мин $\left(\frac{300}{60}\ об/сек\right)$.

Задаемся $C_s = 4{,}2$ *см/дж* $^{1/4}$; $\eta = 0{,}9$ (рис. 168). Тогда

$$\tau \sqrt{p} \approx C_s \sqrt[4]{\frac{P_i}{n_N}} = 4{,}2 \sqrt[4]{\frac{100 \cdot 10^3 \cdot 60}{300 \cdot 0{,}9}} = 51{,}3 \text{ см.}$$

Из табл. 48 находим число пар полюсов $p = 2$ и ориентировочно $\beta = 1{,}$? ($p = 3$ очевидно хуже для конструктивного выполнения компенсационной обмотки у машин такой мощности).

Полюсное деление и диаметр

$$\tau = \frac{51{,}3}{\sqrt{2}} = 36{,}4 \text{ см}; \quad D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 36{,}4}{\pi} = 46{,}4 \text{ см.}$$

Согласно табл. 49 принимаем

$$D = \mathbf{49{,}3} \textbf{ см.}$$

Уточняем величину полюсного деления

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi 49{,}3}{4} = \mathbf{38{,}3} \textbf{ см.}$$

2. Определение длины якоря. По рис. 170 выбираем

$$B_\delta = 0{,}96 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2; \quad A = 380 \text{ а/см}; \quad \alpha_i = 0{,}72.$$

Значение $B_\delta$ несколько выше чем у нерегулируемых машин подобной мощности, что объясняется стремлением получить более устойчивую работу при максимальных оборотах.

Постоянная $C_A$

$$C_A = \frac{1}{\pi^2 \alpha_i B_\delta A} = \frac{10^8}{\pi^2 0{,}72 \cdot 9600 \cdot 380} = 3{,}87.$$

Проверяем $C_A$ по рис. 171 и определяем длину

$$l_i = \frac{C_A P_i}{D^2 n_N} = \frac{3{,}87 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 60}{49{,}3^2 \cdot 300 \cdot 0{,}9} = 35{,}4 \text{ см.}$$

Якорь выполняем без радиальных каналов, т. к. в машине предполагается аксиальная вентиляция.

Принимаем $l_1 = l_i \approx 35{,}5$ *см.*

Длина железа

$$l_{Fe} = l_1 k_п = 35{,}5 \cdot 0{,}92 = \mathbf{32{,}7} \textbf{ см.}$$

Уточненное значение $\beta$

$$\beta = \frac{\tau}{l} = \frac{38{,}3}{35{,}5} = 1{,}08.$$

3. Окружная скорость вращения якоря:

$$v_a = \pi D n_N = \pi 49{,}3 \cdot \frac{300}{100 \cdot 60} = 7{,}75 \textbf{ м/сек};$$

$$v_{a\,max} = \pi D n_{max} = \pi 49{,}3 \cdot \frac{1200}{100 \cdot 60} = \mathbf{31} \textbf{ м/сек.}$$

4. Частота перемагничивания:

$$f_N = p n_N = 2 \cdot \frac{300}{60} = \mathbf{10} \textbf{ гц}; \quad f_{max} = p n_{max} = 2 \cdot \frac{1200}{60} = \mathbf{40} \textbf{ гц.}$$

5. Длина полюсной дуги

$$b_{pi} = \alpha_i \tau = 0{,}72 \cdot 38{,}3 = 27{,}6 \textbf{ см.}$$



### III. Выбор обмотки якоря, числа пазов и коллекторных пластин (§ 10-4)

1. Ток якоря

$$I = \frac{P}{U\eta} = \frac{100 \cdot 10^3}{440 \cdot 0{,}9} = 252 \text{ а.}$$

2. Из условий величины тока в одной параллельной ветви выбираем простую волновую обмотку с изоляцией класса В

$$i_a = \frac{I}{2a} = \frac{252}{2} = 126 \text{ а.}$$

3. Ориентировочное число пазов

$$Z = \frac{\pi 49{,}3 \cdot 450 \cdot 0{,}4^2 \cdot 4 \cdot 0{,}4}{380} \approx 47.$$

Плотность тока для средних машин (предварительно)

$$s = 2 + (1 \div 1{,}5)\, v_a^{0{,}25} = 2 + (1 \div 1{,}5) \cdot 7{,}75^{0{,}25} = (3{,}67 \div 4{,}5) \text{ а/мм}^2.$$

Принимаем верхний предел, поскольку машина работает как при малых так и при больших скоростях вращения.

Выбираем также соответствующие обычным значениям машин средней мощности величины

$$\lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0{,}4; \quad \lambda_2 = \frac{h_п}{b_п} = 4; \quad \varphi_{Cu} = 0{,}4.$$

4. Э. д. с. двигателя (ориентировочно)

$$E = U_N\left(1 - \frac{1-\eta}{2}\right) = 440\left(1 - \frac{0{,}1}{2}\right) = 418 \textbf{ в.}$$

5. Число активных проводников при принятой индукции $B_\delta = 9600$ *гс*

$$N = \frac{E \cdot a}{p n_N \alpha_i \tau l_i B_\delta} = \frac{418 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 10^8}{2 \cdot 300 \cdot 0{,}72 \cdot 38{,}3 \cdot 35{,}5 \cdot 9600} = 445.$$

6. Количество элементарных пазов в реальном пазу

$$u = \frac{N}{2Z} = \frac{445}{2 \cdot 47} = 4{,}74.$$

Для простой волновой обмотки $u$ должно быть целое число; возможно $u = 3$ или 5 (табл. 51).

Принимаем $u = 5$, т. к. это не нарушает принятого нами распределения нагрузок в меди и железе, и, кроме того, позволяет получить большее число коллекторных пластин, что необходимо для снижения $\varepsilon_{к.\,ср}$.

7. Число пазов

$$Z = \frac{N}{2u} = \frac{445}{10} = 44{,}5.$$

Из условия выполнимости простой волновой обмотки окончательно принимаем

$$Z = 45.$$

8. Зубцовое деление

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi 49{,}3}{45} = \mathbf{3{,}44} \textbf{ см.}$$

9. Число коллекторных пластин

$$K = uZ = 5 \cdot 45 = 225.$$

Минимальное число коллекторных пластин из условия допустимости $\varepsilon_{к\,max}$ для компенсированных машин

$$K_{min} = \frac{U2p}{\varepsilon_{к\,max}} = \frac{440 \cdot 4}{28} = 63; \quad K > K_{min}.$$

10. Диаметр коллектора

$$D_К = 0{,}7D = 0{,}7 \cdot 49{,}3 = 34{,}5\ см\ (\text{принимаем } D_К = 35\ см).$$

11. Коллекторное деление

$$t_к = \beta_i + \beta_к = \frac{\pi D_к}{K} = \frac{\pi \cdot 35}{225} = \mathbf{0{,}488}\ \boldsymbol{см},$$

где $\beta_i \approx 0{,}1\ см$ — толщина изоляции;
$\beta_к = 0{,}388\ см$ — толщина коллекторной пластины.

12. Ширина паза (ориентировочно)

$$b_п = \lambda t_1 = 0{,}4 \cdot 3{,}44 = 1{,}375\ см.$$

13. Требуемое сечение проводника

$$q_a = \frac{i_a}{s_a} = \frac{125}{4{,}5} = 28\ мм^2.$$

В соответствии с табл. 52 при частоте перемагничивания 40 *гц* допустимая высота проводника $h' = 8{,}6\ мм$, высота паза $h_п = 48\ мм$. Принимаем $2(b' \times h') = 2(1{,}68 \times 8{,}6) = 2 \cdot 14{,}2 = \mathbf{28{,}4}\ \boldsymbol{мм^2}$.

Окончательные размеры паза (толщина изоляции $\Delta$ класса В по приложению IV)

$$b_п = b'u + \Delta = 1{,}68 \cdot 5 + 5 = 1{,}34\ см;$$

$$h_п = h'u_в + \Delta_в + h_к = 8{,}6 \cdot 4 + 6{,}7 + 4{,}5 = 45{,}6\ мм,$$

где $h_к = 4{,}5\ мм$ — высота клина.

Округляем высоту паза до 46 *мм*. Окончательно $b_п \times h_п = \mathbf{1{,}34 \times 4{,}6}\ \boldsymbol{см}$.

15. Расчет шагов обмотки. Выбираем равносекционную обмотку

$$y_{1п} = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon_п = \frac{45}{4} - \frac{1}{4} = 11;\ y_1 = y_{1п}u = 11 \cdot 5 = 55;$$

$$y = y_к = \frac{K_{(\mp)}1}{p} = \frac{225 - 1}{2} = 112;\ y_2 = y - y_1 = 112 - 55 = 57.$$

16. Сопротивление обмотки якоря.

Длина полувитка

$$\frac{1}{2} l_{wa} = l + l_л = 35{,}5 + 53{,}6 = 89{,}1\ см,$$

где $l_л \approx 1{,}4\tau \cdot 38{,}3 = 53{,}6\ см$.

Полная длина всех проводников обмотки

$$L_{wa} = \frac{1}{2} l_{wa} N = 89{,}1 \cdot 450 \cdot 10^{-2} = 401\ м.$$

$$r_{a20} = \frac{L_{wa}}{57(2a)^2 q_a} = \frac{401}{57 \cdot 4 \cdot 28{,}4} = 0{,}062\ ом;$$

$$r_{a75} = 1{,}22 r_{a20} = 1{,}22 \cdot 0{,}062 = 0{,}0756\ ом.$$

17. Потери в якоре

$$p_{Cu\,a} = I^2 r_{a75} = 252^2 \cdot 0{,}0756 = 4{,}8 \cdot 10^3\ вт.$$

18. Уточняем величины $\Phi$, $B_\delta$, $A$ и $s_a$.

Номинальный магнитный поток и индукция в воздушном зазоре

$$\Phi = \frac{Ea}{pnN} = \frac{418 \cdot 1 \cdot 60}{2 \cdot 300 \cdot 450} = \mathbf{0{,}093}\ \boldsymbol{вб};$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i l_i \tau} = \frac{0{,}093}{0{,}72 \cdot 36{,}5 \cdot 38{,}3} = \mathbf{0{,}95 \cdot 10^{-4}}\ \boldsymbol{вб/см^2}.$$



Линейная нагрузка и плотность тока

$$A = \frac{i_a N}{\pi D} = \frac{126 \cdot 450}{\pi \cdot 49{,}3} = \mathbf{336}\ \boldsymbol{а/см};\quad s_a = \frac{i_a}{q_a} = \frac{126}{28{,}4} = \mathbf{4{,}43}\ \boldsymbol{а/мм^2}.$$

19. Проверка ширины паза из условий максимально допустимой индукции в ножке зубца

$$b_{z3} = \frac{\pi(D - 2h_п)}{Z} - b_п = \frac{\pi(49{,}3 - 9{,}2)}{45} - 1{,}34 = 1{,}46\ см;$$

$$B'_{z3} = B_\delta \frac{l_i t_1}{l_{Fe} b_{z3}} = 9500 \frac{35{,}5 \cdot 3{,}44}{32{,}7 \cdot 1{,}46} = 24\,300\ гс.$$

Для такого типа машин полученная индукция допустима.

20. Воздушный зазор под главным полюсом для диаметров якоря до 50 *см*

$$\delta \approx 0{,}009D = 0{,}009 \cdot 49{,}3 = 0{,}444\ см;\ \text{принимаем } \delta = 4{,}5\ мм.$$

Расчеты характеристики холостого хода, обмоток возбуждения, компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов производятся так же, как и в предыдущих примерах.

21. Потери в железе.

Индукция в среднем сечении зубца

$$B_{z_2} = B_\delta \frac{l_i t_1}{l_{Fe} b_{z_2}} = 9500 \frac{35{,}5 \cdot 3{,}44}{32{,}7 \cdot 1{,}78} = 19\,900\ гс,$$

где

$$b_{z_2} = \frac{\pi(D - h_п)}{Z} - b_п = \frac{\pi(49{,}3 - 4{,}6)}{45} - 1{,}34 = 1{,}78\ см.$$

Индукцию в спинке якоря выбираем $B_{j_1} = 13\,000\ гс$.

Высота спинки и внутренний диаметр якоря

$$h_{j_1} = \frac{\Phi}{2 l_{Fe} B_a} = \frac{0{,}093 \cdot 10^8}{2 \cdot 32{,}7 \cdot 13\,000} = 10{,}9\ см;$$

$$D_{j_1} = D - 2h_п - 2h_{j_1} = 49{,}3 - 9{,}2 - 21{,}8 = 18{,}3\ см.$$

Жести якоря необходимо шихтовать прямо на вал.

Вес железа зубцов и спинки якоря:

$$G_z = Z l_{Fe} h_п b_{z_2} 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 45 \cdot 32{,}7 \cdot 4{,}6 \cdot 1{,}78 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 94\ кг;$$

$$G_{j_1} = \frac{\pi[(D - 2h_п)^2 - D_{j_1}^2]}{4} l_{Fe} 7{,}8 \cdot 10^{-3} = \frac{\pi[(49{,}3 - 9{,}2)^2 - 18{,}3^2]}{4} \times 32{,}7 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 255\ кг.$$

Потери в железе ярма якоря при $n_N$ и $n_{max}$:

$$p_j = \frac{f_N(f_N + 70)}{500}\left(\frac{B_a}{10\,000}\right)^2 G_{j_1} 10^{-3} = \frac{10(10 + 70)}{500}\left(\frac{13\,000}{10\,000}\right)^2 255 \cdot 10^{-3} = 0{,}69\ квт;$$

$$p'_j = \frac{f_{max}(f_{max} + 70)}{500}\left(\frac{B_a \frac{n_N}{n_{max}}}{10000}\right)^2 G_{Fe\,a} 10^{-3} = \frac{40(40 + 70)}{500}\left(\frac{13\,000 \frac{300}{1200}}{10\,000}\right)^2 \times 255 \cdot 10^{-3} = 0{,}237\ квт.$$

Потери в железе зубцов якоря при $n_N$ и $n_{max}$:

$$p_z = \frac{f_N(f_N+30)}{350}\left(\frac{B_{z_2}}{10\,000}\right)^2 G_{Fe\,z}10^{-3} = \frac{10\,(10+30)}{350}\,\frac{(19\,900)^2}{(10\,000)} \times$$

$$\times\, 94 \cdot 10^{-3} = 0{,}425 \ \textit{квт};$$

$$p_z' = \frac{f_{max}(f_{max}+30)}{350}\left(\frac{B_{z_2}\dfrac{n_N}{n_{max}}}{10\,000}\right)^2 G_{Fe\,z}10^{-3} =$$

$$= \frac{40\,(40+30)}{350}\left[\frac{19\,900\,\dfrac{300}{1200}}{10\,000}\right]^2 94 \cdot 10^{-3} = 0{,}186 \ \textit{квт}.$$

22. Проверка перегрева меди якоря при номинальной скорости, когда самовентиляция мало эффективна.

Удельные тепловые нагрузки:

а) якоря от потерь в железе

$$w_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{\pi D l_1} - \frac{0{,}69+0{,}425}{\pi 49{,}3 \cdot 36{,}5} = 0{,}203 \ \textit{вт/см}^2;$$

б) якоря от потерь в меди

$$w_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{\dfrac{1}{2}\, l_{wa}\pi D} = \frac{4{,}8 \cdot 10^3}{89{,}1 \cdot \pi \cdot 49{,}3} = 0{,}348 \ \textit{вт/см}^2;$$

в) в пазовой изоляции

$$w_i = w_{Cu}\frac{t_1}{П} = 0{,}348\,\frac{3{,}44}{11{,}88} = 0{,}101 \ \textit{вт/см}^2,$$

где

$$П = 2\,(h_п + b_п) = 2\,(1{,}34 + 4{,}6) = 11{,}88 \ \textit{см};$$

г) поверхности лобовых частей

$$w_л = w_{Cu}.$$

Превышение температуры обмотки якоря при аксиальной вентиляции по гл. 6

$$\theta_{Cu} = \left[\left(\frac{w_{Cu}+w_{Fe}}{\alpha_{Fe}} + \frac{w_i}{k_i}\Delta_i\right) l + \left(\frac{w_л t_1}{\alpha_л П k_0} + \frac{w_i}{k_i}\Delta_i\right) l_л\right]\frac{1}{l_л + l} + \theta_a,$$

где

$$\alpha_{Fe} = 14 \cdot 10^{-4}\left[(1+\sqrt{v_\delta})\,\frac{b_{z_1}}{t_1} + \frac{d_к n_к}{D}(1+\sqrt{v_к})\right] \textit{вт/см}^{2\circ}\,C;$$

$$\alpha_л П\,\frac{k_0}{t_1} = 16{,}7 \cdot 10^{-4}(1+\sqrt{v_л})\,\frac{Пk_0}{t_1}; \ \theta_a = \frac{1}{2}\Delta\theta_a.$$

Для теплового расчета необходимо знание скоростей воздуха в различных частях машины.

В предварительном расчете следует задаться такими скоростями, которые бы обеспечили необходимый отвод тепла и оказались бы реально выполнимы. Согласно гл. 6 средняя скорость воздуха у поверхности якоря и в лобовых частях

$$v_1 \approx v_\delta = 0{,}45 v_a \frac{50}{f} = 0{,}45 \cdot 7{,}75\,\frac{50}{10} = 17{,}4 \ \textit{м/сек}.$$

Скорость воздуха в каналах $v_к = \sqrt{\tau} = \sqrt{38{,}3} = 6{,}1$ *м/сек*; принимаем $v_к = 6{,}0$ *м/сек*.



Располагаем 20 каналов с $d_к = 28$ *мм* на диаметре 33 *см* и 10 каналов с $d_к = 28$ *мм* на диаметре 23 *см*.

Расход воздуха через каналы

$$V_к = \frac{\pi d_к^2}{4} n_к v_к = \frac{\pi \cdot 2{,}8^2}{4} \cdot 30 \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-4} = 0{,}111 \ \textit{м}^3\textit{/сек}.$$

Общий расход воздуха

$$V = \frac{\Sigma p}{1{,}1\Delta\theta_a} = \frac{(1-0{,}9)\dfrac{100}{0{,}9}}{1{,}1 \cdot 20} - \frac{11 \cdot 12}{1{,}1 \cdot 20} = 0{,}505 \ \textit{м}^3\textit{/сек}.$$

Расход воздуха через пространство между полюсами

$$V_к' = V - V_к = 0{,}505 - 0{,}111 = 0{,}394 \ \textit{м}^3\textit{/сек}.$$

Получаем

$$\alpha_{Fe} = 14 \cdot 10^{-4}\left[(1+\sqrt{17{,}4})\,\frac{2{,}1}{3{,}44} + \frac{2{,}8 \cdot 30}{49{,}3}(1+\sqrt{6})\right] = 126 \cdot 10^{-4} \ \textit{вт/см}^{2\circ}\,C;$$

$$\alpha_л \frac{Пk_0}{t_1} = 16{,}7 \cdot 10^{-4}(1+\sqrt{17{,}4})\,\frac{11{,}88 \cdot 0{,}5}{3{,}44} = 149 \cdot 10^{-4} \ \textit{вт/см}^{2\circ}\,C;$$

$$k_i = 16 \cdot 10^{-4} \ \textit{вт/см}^\circ C; \ \Delta_i = 0{,}25 \ \textit{см};$$

$$\theta_{Cu} = \left[\left(\frac{0{,}348+0{,}203}{126 \cdot 10^{-4}} + \frac{0{,}101 \cdot 0{,}25}{16 \cdot 10^{-4}}\right) 35{,}5 +\right.$$

$$\left. + \left(\frac{0{,}348}{149 \cdot 10^{-4}} + \frac{0{,}101 \cdot 0{,}25}{16 \cdot 10^{-4}}\right) 53{,}6\right]\frac{1}{89{,}1} + \frac{1}{2}\,20 = 47{,}3 + 10 = 57{,}3^\circ\,C,$$

т. е. машина имеет тепловой запас.

## IV. Коммутация (§ 10-8)

1. Для простой волновой обмотки ширина щетки обычно равна ширине 2—3 коллекторных пластин. Примем, в соответствии с приложением VII $b_щ \times l_щ = 12{,}5 \times 20$ *мм*.

2. Максимальная окружная скорость коллектора

$$v_{к\,max} = \pi D_к n_{max} = \pi \cdot 35 \cdot \frac{1200}{60} \cdot 10^{-2} = \mathbf{22} \ \textit{\textbf{м/сек}}.$$

По приложению VII выбираем щетки марки ЭГ-4, для которых нормальная плотность тока $s_щ = 12$ *а/см*².

3. Длина всех щеток и их количество на один болт

$$l_к = n_щ l_щ = \frac{I}{s_щ p b_щ} = \frac{252}{12 \cdot 2 \cdot 1{,}25} = 8{,}4 \ \textit{см};$$

$$n_щ = \frac{l_к}{l_щ} = \frac{8{,}4}{2} = 4{,}2; \ \text{принимаем 5 щеток.}$$

4. Полная длина коллектора

$$l_к' = n_щ(l_щ + 0{,}8) = 5\,(2 + 0{,}8) = \mathbf{14} \ \textit{\textbf{см}}.$$

5. Ширина коммутационной зоны

$$b_{к.\,з} = \left(\beta + u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right) t_к \frac{D}{D_к} = \left(2{,}56 + 5 - \frac{1}{2} + \frac{1}{4}\right) 0{,}488\,\frac{49{,}3}{35} = 5{,}0 \ \textit{см},$$

где $\beta = \dfrac{b_щ}{t_к} = \dfrac{12{,}5}{4{,}88} = 2{,}56.$

6. Ширина междуполюсного окна

$$c_p = \tau(1 - \alpha) = 38{,}3\,(1 - 0{,}72) = 10{,}7 \text{ см}.$$

7. Ширина полюсного наконечника дополнительного полюса

$$b_{р\,к} \approx b_{к.\,з} \leqslant c_p.$$

8. Расчет реактивной э. д. с.
Магнитная проводимость паза

$$\lambda_п = \frac{h_1 + 3h_0}{3b_п} = \frac{38{,}6 + 3 \cdot 5{,}85}{3 \cdot 13{,}4} = 1{,}4.$$

Магнитная проводимость по коронкам зубцов

$$\lambda_к = \frac{b_{z_1}}{2\delta'_к} + 0{,}3 = \frac{2{,}1}{2 \cdot 1{,}0} + 0{,}3 = 1{,}35,$$

где $\delta'_к$ — воздушный зазор под дополнительным полюсом; принимаем $\delta'_к = 1$ см.
Магнитная проводимость рассеяния лобовых частей для немагнитных бандажей $\lambda_л = 0{,}5$.

Реактивная э. д. с. при 300 об/мин

$$e_{р\,(300)} = 2Av_a w_s l_1 \zeta = 2 \cdot 366 \cdot 775 \cdot 1 \cdot 35{,}5 \cdot 9{,}65 \cdot 10^{-8} = 1{,}94 \text{ в};$$

$$e_{р\,(1200)} = e_{р\,(300)} \frac{n_{max}}{n_N} = 1{,}94 \cdot 4 = 7{,}76 \text{ в},$$

$$\zeta = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}\left[(\lambda_п + \lambda_к)\frac{2 \cdot u'}{\beta} + \lambda_л \frac{l_л}{l}\right] =$$

$$= 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}\left[(1{,}4 + 1{,}35) \cdot 2{,}5 + 0{,}5\frac{53{,}6}{35{,}5}\right] = 9{,}65 \cdot 10^{-8},$$

где

$$\frac{2u'}{\beta} = f(u, \varepsilon, \beta) = \frac{2 \cdot 3{,}2}{2{,}56} = 2{,}5 \text{ (табл. 53)}.$$

Как видно, реактивная э. д. с. при максимальной скорости вращения может принимать предельные значения. Это обстоятельство также приводит к необходимости применения компенсационной обмотки, поскольку резкое искажение поля и затруднительные условия коммутации значительно снижают надежность работы машины при максимальных оборотах. Необходимо отметить, что в данной машине для снижения реактивной э. д. с. можно было бы несколько увеличить щеточное перекрытие $\beta$.

## *Пример 5*

### Расчет двигателя

(вариант примера 4 при отсутствии компенсационной обмотки)

Определим изменение габаритов машины при отсутствии компенсационной обмотки.

1. Максимальное междуламельное напряжение при холостом ходе

$$\varepsilon_{к\,max} = \frac{2pU}{\alpha_i K} = \frac{4 \cdot 440}{0{,}72 \cdot 225} = 10{,}85 \text{ в}.$$

2. Максимальное междуламельное напряжение при нагрузке и $n_N = 300$ об/мин.

На рис. 196 приведена переходная характеристика рассчитываемого двигателя. Точка «$b$» — точка холостого хода на характеристике. При нагрузке



следует отложить от точки «$b$» вправо и влево величину м. д. с. реакции якоря, равную

$$\frac{1}{2} F_a = \frac{1}{2} b_i A = 27{,}6 \cdot 366 \cdot \frac{1}{2} = 5050 \text{ а}.$$

Предполагая наличие на главных полюсах согласно действующей последовательной обмотки, рассчитанной на компенсацию размагничивающего действия поперечной реакции якоря, следует сдвинуть отрезок $c'f' = F_a$ таким образом, чтобы площадь $cbe = bdf$. Тогда кривая $ebd$ даст распределение индукции при нагрузке.

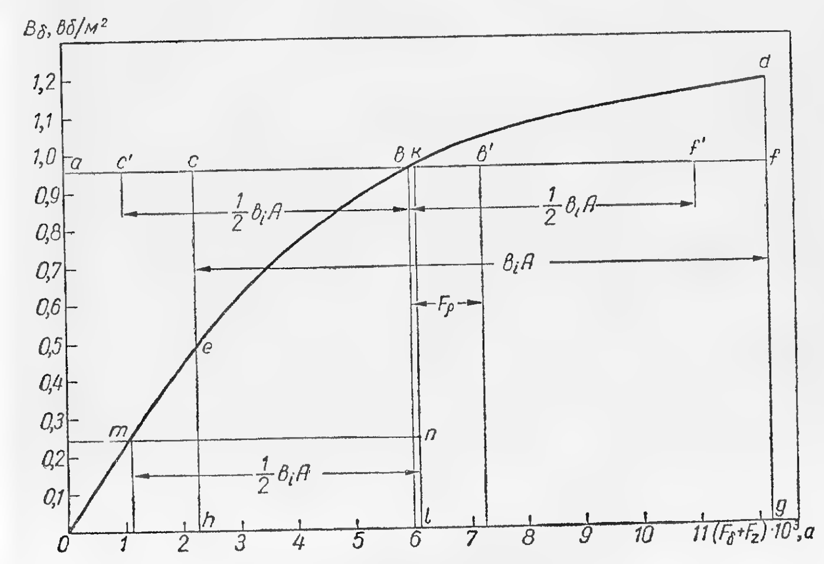



Рис. 196. Переходная характеристика.

Максимальное междуламельное напряжение возрастает пропорционально отношению отрезков $\frac{dg}{fg}$

$$\varepsilon_{к\,max\,н} = \varepsilon_{к\,max\,о} \frac{dg}{fg} = 10{,}85 \frac{dg}{fg} = 13{,}4 \text{ в}.$$

3. Максимальное междуламельное напряжение при нагрузке и $n_{max} = 1200$ об/мин.

Величина потока и индукции при этом достигает $\frac{1}{4}$ от номинальных значений $\left(B_\delta = \frac{1}{4}\, 9500 = 2370 \text{ гс}\right)$. Точка «$m$» на переходной характеристике — точка холостого хода.

При нагрузке и достижении требуемых оборотов поступаем аналогично предыдущему по отношению к точке «$m$». Здесь, как видно, один край полюса изменяет полярность. Возрастание $\varepsilon_{к\,max}$ в этом случае пропорционально отношению $\frac{kl}{nl}$

$$\varepsilon_{к\,max\,н} = \varepsilon_{к\,max\,о} \frac{kl}{nl} = 10{,}85 \frac{kl}{nl} = 44 \text{ в},$$

что недопустимо. Чтобы снизить при максимальных оборотах $\varepsilon_{к\,max\,н}$, следует увеличить число коллекторных пластин

$$K_{min} = \frac{\varepsilon_{к\,max\,н}}{\varepsilon_{к\,max\,доп}} = 225\frac{44}{25 \div 28} = 396 \div 354.$$

При этом следует увеличить число параллельных ветвей, т. к. при сохранении простой волновой обмотки недопустимо возрастает линейная нагрузка

$$A = 366\frac{44}{25 \div 28} = (645 - 575)\ а/см.$$

Применяя простую петлевую обмотку с $K = 450$ при прежних значениях нагрузок $A$ и $B_\delta$, необходимо увеличить диаметр коллектора, а соответственно и диаметр якоря, сократив его длину. Принимая $t_{к\,min} = 4$ *мм*, получим (ориентировочно) новые значения $D_к$, $D$ и $l_i$:

$$D_{к\,min} = \frac{t_{к\,min}K_{min}}{\pi} = \frac{0{,}4 \cdot 450}{\pi} = 57{,}3\ см;$$

$$D = \frac{D_{к\,min}}{0{,}85} = \frac{57{,}3}{0{,}85} = 67{,}5\ см;\ \tau = 53\ см;$$

$$l_i = 35{,}5\left(\frac{49{,}3}{67{,}5}\right)^2 = 19\ см;\quad \beta = \frac{\tau}{l_i} = \frac{53}{19} = 2{,}78;$$

$$v_{к\,max} = \pi D_к n_{max} = \pi \cdot \frac{57{,}3}{100} \cdot \frac{1200}{60} = 36\ м/сек.$$

Отсюда видно, что полученные размеры якоря выходят за пределы рациональной соразмерности машин. Габариты коллектора превосходят допустимые значения для данной скорости. Обеспечение надежной коммутации значительно усложняется. Следовательно, компенсационная обмотка не только увеличивает надежность работы машины, но и повышает ее экономические показатели.

Дальнейший расчет может быть произведен, руководствуясь общей методикой и примерами 1 и 2.

## *Пример 6*

### Расчет генератора

Спроектировать генератор общего применения $P = 23$ *квт*, $n = 970$ об/мин, $U_N = 230$ *в*.

Ток нагрузки

$$I = \frac{P}{U_N} = \frac{23 \cdot 10^3}{230} = 100\ а.$$

Ток возбуждения принимаем равным 3% от тока нагрузки

$$i_f = 0{,}03I = 0{,}03 \cdot 100 = 3\ а.$$

Ток якоря

$$I_a = I + i_f = 100 + 3 = 103\ а.$$

Сопротивление якорной цепи машины типа ПН, согласно рис. 167, принимаем равным 8,7%. Тогда

$$r_a = 0{,}087\frac{U_N}{I_N} = 0{,}087\frac{230}{103} = 0{,}197\ ом.$$

Электродвижущая сила и расчетная мощность генератора

$$E = U + I_a r_a + \Delta U_{щ} = 230 + 103 \cdot 0{,}197 + 2 = 252{,}3\ в,$$

$$P_i = EI_a = 252{,}3 \cdot 103 = 26 \cdot 10^3\ вт.$$



Выбираем электромагнитные нагрузки, согласно рис. 170

$$A = 300\ а/см;\quad B_\delta = 0{,}75 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2.$$

Геометрические размеры якоря

$$D^2 ln = C_A P_i,$$

где

$$C_A = \frac{1}{\pi^2 \alpha_i A B_\delta}.$$

Задаваясь $\alpha_i = 0{,}7$, $p = 2$ и выбирая по рис. 7 величину $\beta = 1{,}57$, определяем диаметр

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_i}{n}2p\beta\frac{1}{\pi}C_A} = \sqrt[3]{\frac{26 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 1{,}57 \cdot 60}{970\pi} \cdot 6{,}54} = 27{,}5\ см,$$

где

$$C_A = \frac{1 \cdot 10^4}{\pi^2 0{,}7 \cdot 300 \cdot 0{,}75} = 6{,}54;\quad K_A = \frac{1}{C_A} = 0{,}153\ дж/см^3.$$

Принимаем $D = 28$ *см*. Тогда

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi 28}{4} = 22\ см;\qquad l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{22}{1{,}57} = 14\ см.$$

$$v_a = \pi D n 10^{-2} = \pi 28 \cdot \frac{970}{60} \cdot 10^{-2} = 14{,}2\ м/сек.$$

Частота $f = pn = \frac{2 \cdot 970}{60} = 32{,}3$ *гц*, т. е. находится в допустимых пределах. Выбираем обмотку якоря. При простой волновой обмотке ток в параллельной ветви

$$i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{103}{2} = 51{,}5\ а.$$

При простой петлевой обмотке ток в параллельной ветви

$$i_a = \frac{103}{4} = 25{,}8\ а.$$

Выгоднее принять простую волновую обмотку, так как при этом сечение провода будет больше, и, следовательно, заполнение паза будет лучше. Кроме того, как известно, простая волновая обмотка не требует уравнительных соединений.

Диаметр коллектора

$$D_к = 0{,}75D = 0{,}75 \cdot 28 = 21\ см.$$

Максимально возможное число коллекторных пластин

$$K_{max} = \frac{\pi D_к}{t_{к\,min}} = \frac{\pi 21}{0{,}4} = 165.$$

Принимаем $\beta_к = 0{,}35$; $\beta_i = 0{,}05$ *см*.

Минимальное число коллекторных пластин

$$K_{min} = \frac{U \cdot 2p}{\varepsilon_к} = \frac{230 \cdot 4}{15} \approx 58.$$

Полезный поток машины на полюс

$$\Phi = B_\delta \tau \alpha_i l_i = 0{,}75 \cdot 10^{-4} \cdot 22 \cdot 0{,}7 \cdot 14 = 0{,}016\ вб.$$

Число активных проводников

$$N = \frac{Ea}{pn\Phi} = \frac{252{,}3 \cdot 60 \cdot 1}{2 \cdot 970 \cdot 0{,}016} \approx 500.$$

Таблица 59

## Данные построенных машин постоянного тока серии ПН

| Тип | Основные данные: Мощность $P$ | Напряжение $U$ | Скорость вращения $n$ | Диаметр якоря $D$ | Длина якоря $l$ | Обмотка якоря: $\frac{2a}{2p}$ | $Z$ | Число проводников в пазу $s_п$ | Число витков в секции $w_s$ | Медь |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ПН-52 | 0,52 | 220 | 1450 | 9,8 | 9 | 2/2 | 14 | 138 | 17 | 0,55/0,70 |
| ПН-10 | 1,0 | 220 | 1450 | 11,8 | 11 | 2/2 | 18 | 84 | 10—11 | 0,93/1,09 |
| ПН-17,5 | 1,75 | 220 | 1450 | 13 | 11,8 | 2/2 | 20 | 60 | 7—8 | 1,25/1,43 |
| ПН-28,5 | 2,8 | 220 | 1500 | 16 | 6,5 | 2/4 | 29 | 42 | 7 | 1,35/1,53 |
| ПН-45 | 4,4 | 220 | 1500 | 16 | 10 | 2/4 | 29 | 28×2 | (5—4—5) 2 | 1,16/1,34 |
| ПН-68 | 6,5 | 220 | 1550 | 18,5 | 9,5 | 2/4 | 31 | 24×2 | 4×2 | 1,45/1,63 |
| ПН-85 | 9,0 | 220 | 1500 | 18,5 | 16 | 2/4 | 31 | 16×4 | (3×2—3) 4 | 1,25/1,43 |
| ПН-100 | 15 | 220 | 1560 | 24,5 | 8 | 2/4 | 35 | 2×4×2 | 2 | $\frac{1,25\times6,9}{1,5\times7,15}$ |
| ПН-145 | 21 | 220 | 1500 | 24,5 | 12 | 2/4 | 35 | 2×3×2 | 2 | $\frac{1,68\times6,9}{1,93\times7,15}$ |
| ПН-205 | 33,5 | 220 | 1580 | 29,5 | 10 | 2/4 | 35 | (2×5×1) 2 | 1 | $\frac{1,16\times6,9}{1,41\times7,15}$ |
| ПН-290 | 29 | 220 | 1000 | 29,5 | 14 | 2/4 | 33 | 2×3×2 | 2 | $\frac{2,44\times6,9}{2,74\times7,2}$ |
| ПН-290 | 23 | 230 | 970 | 29,5 | 14 | 2/4 | 33 | 2×4×2 | 2 | $\frac{1,81\times6,9}{2,06\times7,15}$ |
| ПН-400 | 42 | 230 | 970 | 34 | 14 | 2/4 | 42 | (2×4×1) 2 | 1 | $\frac{1,35\times8,6}{1,6\times8,85}$ |
| ПН-550 | 60 | 220 | 980 | 34 | 19 | 2/4 | 42 | (2×3×1) 2 | 1 | $\frac{1,95\times8,6}{2,2\times8,85}$ |
| ПН-550 | 48 | 230 | 970 | 34 | 19 | 2/4 | 42 | (2×4×1) 2 | 1 | $\frac{1,35\times8,6}{1,6\times8,85}$ |

| Тип | Коллектор: $D_к$ | $L_к$ | $K$ | Главные полюса, параллельная: Число витков на полюс | Медь | Главные полюса, последовательная: $w_f$ | Медь | Добавочные полюса: $w_к$ | Число полюсов | Медь | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ПН-52 | 6,4 | 4,5 | 56 | 4200 | 0,27/0,295 | 24 | 1,25/1,43 | 340 | 4 | 1,08/1,26 | Двигатель |
| ПН-10 | 8 | 4,5 | 72 | 4200 | 0,33/0,36 | 19 | 1,45/1,63 | 265 | 1 | 1,68/1,93 | » |
| ПН-17,5 | 8 | 4,5 | 80 | 4400 | 0,41/0,445 | 16 | $\frac{1,16\times3,28}{1,25\times4,65}$ | 212 | 1 | 2,1/2,4 | » |
| ПН-28,5 | 12,5 | 5,0 | 87 | 2600 | 0,44/0,475 | 16 | 1,0×4,4 | 108 | 4 | $\frac{1,35\times3,28}{1,6\times3,53}$ | » |
| ПН-45 | 12,5 | 5,0 | 87 | 2300 | 0,51/0,55 | 9 | $\frac{1,16\times4,4}{1,44\times4,65}$ | 70 | 4 | $\frac{1,56\times4,4}{1,81\times4,65}$ | » |
| ПН-68 | 12,5 | 5,0 | 93 | 2200 | 0,55/0,59 | 6 | $\frac{1,81\times6,9}{2,06\times7,15}$ | 60 | 4 | $\frac{1,5\times6,9}{1,81\times7,15}$ | » |
| ПН-85 | 12,5 | 6,2 | 93 | 1750 | 0,59/0,63 | 6 | $\frac{2,83\times5,1}{3,13\times5,4}$ | 40 | 4 | $\frac{2,83\times5,1}{3,13\times5,4}$ | » |
| ПН-100 | 17 | 8,5 | 199 | 1500 | 0,8/0,85 | 4 | $\frac{2,1\times12,5}{2,4\times12,8}$ | 47,5 | 4 | 1,0×25 | » |
| ПН-145 | 17 | 8,5 | 105 | 1700 | 0,74/0,79 | 4 | $\frac{2,44\times12,5}{2,34\times12,8}$ | 33,5 | 4 | 1,35×25 | » |
| ПН-205 | 20 | 11,5 | 175 | 1500 | 0,86/0,91 | 3 | (2,44×14,5) 2 | 27,5 | 4 | 1,81×30 | » |
| ПН-290 | 20 | 11,5 | 99 | 1250 | 1,08/1,14 | 6 | (2,44×14,5) 2 | 31,5 | 4 | 1,56×30 | » |
| ПН-290 | 20 | 11,5 | 131 | 1250 | 1,0/1,06 | 6 | (2,44×14,5) 2 | 41,5 | 4 | 1,46×30 | Генератор |
| ПН-400 | 25 | 15,0 | 167 | 1300 | 1,35/1,53 | — | — | 25,5 | 4 | 2,26×3,5 | Двигатель |
| ПН-550 | 25 | 15,0 | 125 | 1120 | 1,35/1,53 | — | — | 25,5 | 4 | 1,56×35 | » |
| ПН-550 | 25 | 15,0 | 167 | 1120 | 1,35/1,53 | — | — | 25,5 | 4 | 2,26×35 | Генератор |

Число коллекторных пластин при $w_s = 2$

$$K = \frac{N}{2w_s} = 125.$$

Следовательно, необходимо принять обмотку с $w_s = 2$.

Из условий симметрии $\left(\frac{K}{a}, \frac{Z}{a} \text{ и } \frac{p}{a} \text{ — целые числа}\right)$, а также из условия выполнимости волновой обмотки $\left(y = \frac{K \mp a}{p} \text{ — целое число}\right)$, выбираем

$$K = 129; \quad Z = \frac{129}{3} = 43.$$

Шаг обмотки

$$y = \frac{K (\mp) 1}{p} = \frac{129 - 1}{2} = 64.$$

Дальнейший расчет может быть произведен по формулам общей методики, как в примерах 1—4. В табл. 59 приведены данные машин типа ПН.

---

# *Глава одиннадцатая*

# АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

## 11-1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ТИПЫ И СЕРИИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Простота конструкции, экономичность и высокая надежность в работе трехфазных асинхронных двигателей обусловили их широкое применение в различных отраслях промышленности. В настоящее время асинхронные двигатели применяются в машиностроении (привод различных станков и механизмов), металлургии (прокатные двигатели, двигатели рольгангов и т. д.), подъемно-транспортных механизмах, угольной, торфо- и нефтедобывающей промышленности (двигатели врубовых машин, буровых и других механизмов), приводах вентиляторов, насосов, гребных винтов и т. д.

Наряду с указанными положительными свойствами, асинхронные двигатели обладают и целым рядом недостатков. Так, например потребление двигателем из сети намагничивающего индуктивного тока приводит к понижению $\cos \varphi$ питающей двигатель сети. Диапазон регулирования скорости асинхронного двигателя весьма ограничен; регулирование скорости при питании от сети может производиться только ступенями (машины с переключением чисел полюсов). В установках малой мощности применяются различные способы плавного регулирования скорости, например введение сопротивления в цепь ротора и пр., однако, эти способы весьма неэкономичны и поэтому не всегда могут быть рекомендованы.

В мощных установках скорость регулируется при помощи разного рода каскадов (каскадов с коллекторными машинами, асинхронно-синхронных каскадов и т. д.).

Благодаря лучшим пусковым характеристикам раньше более широко внедрялись двигатели с кольцами. Относительно маломощные электросети не допускали значительных толчков тока при пуске двигателей. Параллельно с развитием электрификации промышленных предприятий широко распространялся индивидуальный привод. Это привело к дроблению мощности групповых двигателей. При этих условиях асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, как более дешевый, имеющий лучшие рабочие характеристики

и более надежный в работе, во многих случаях вытеснил двигатели с кольцами.

Широкое применение получили короткозамкнутые двигатели с глубоким пазом, с двойной клеткой, с переключением числа пар полюсов. В настоящее время двигатель с короткозамкнутым ротором находит все большее применение в промышленности.

При ограниченных габаритах механизма часто происходит сращивание электродвигателя и приводного механизма — ротор двигателя непосредственно насаживается на вал механизма, а статор запрессовывается в корпус механизма.

Очень часто бывает рациональным фланцевое крепление двигателя (особенно в станкостроении).

По способу механической защиты асинхронные машины можно разделить на следующие типы:

а) открытые — машины, у которых токоподводящие и вращающиеся части не имеют специальных защитных приспособлений;

б) защищенные — машины с деталями, защищающими от попадания внутрь посторонних тел, капель воды и т. п.;

в) закрытые — машины, закрытые от попадания пыли, капель и т. п.;

г) взрывобезопасные — машины, совершенно закрытые, с внешним обдувом по поверхности, предназначенные для работы в шахтах;

д) герметические — машины, предназначеные, например, для работы под водой.

Конструктивный тип машины в значительной степени зависит от области ее применения.

Конструкция. Станины асинхронных двигателей отливаются из чугуна, стали или алюминия, или свариваются из стальных листов. В станину запрессовываются пакеты статора, которые набираются из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*, прессуются и стягиваются нажимными кольцами.

На рис. 197 *а*, *б* представлена конструкция двигателя защищенного типа (155 *квт*, 1500 об/мин) со щитовыми подшипниками, на рис. 198, *а* — конструкция двигателя в закрытом исполнении на стояковых подшипниках, на рис. 198, *б* — в защищенном исполнении и на рис. 199 — быстроходный двигатель типа АТМ-2000.

На рис. 200 и 201 приведены основные данные (к. п. д. и $\cos\varphi$) современных машин.

Статоры мелких и средних машин имеют всыпную обмотку из круглой меди и гильзовую изоляцию паза (рис. 202).

Статоры современных крупных асинхронных двигателей имеют двухслойные корзиночные обмотки с укороченным шагом и с непрерывной изоляцией. Обмотки выполнены из изолированной обмоточной меди прямоугольного сечения (рис. 203).

В большинстве случаев применяются трехфазные шестизонные обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу. Иногда применяются и обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу («дробные обмотки»). Трехзонные обмотки применяются в полюсопереключаемых машинах.



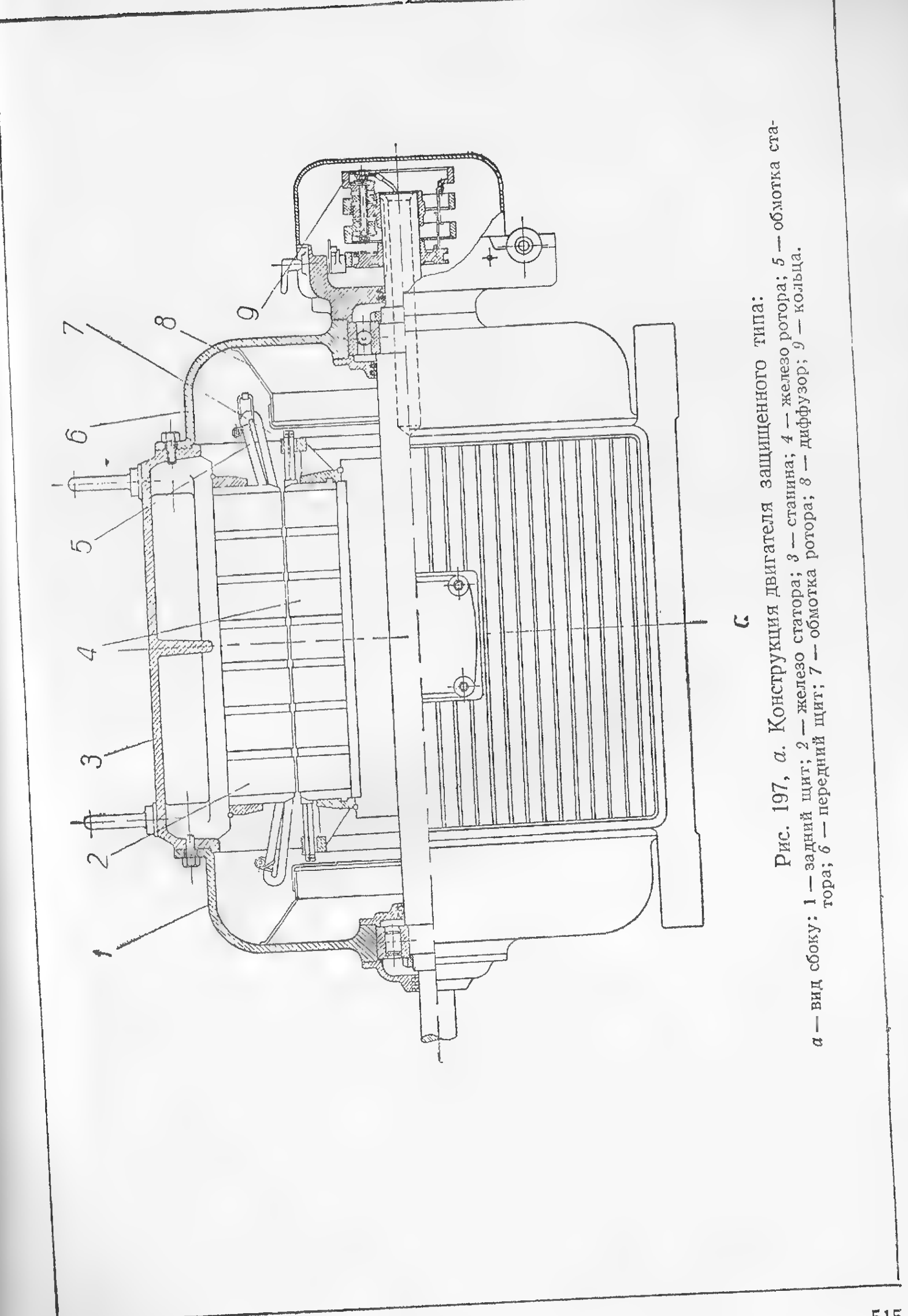



Рис. 197, *а*. Конструкция двигателя защищенного типа:
*а* — вид сбоку: 1 — задний щит; 2 — железо статора; 3 — станина; 4 — железо ротора; 5 — обмотка статора; 6 — передний щит; 7 — обмотка ротора; 8 — диффузор; 9 — кольца.

Рис. 197, *б*. Конструкция двигателя защищенного типа:
*б* — вид со стороны щитов.



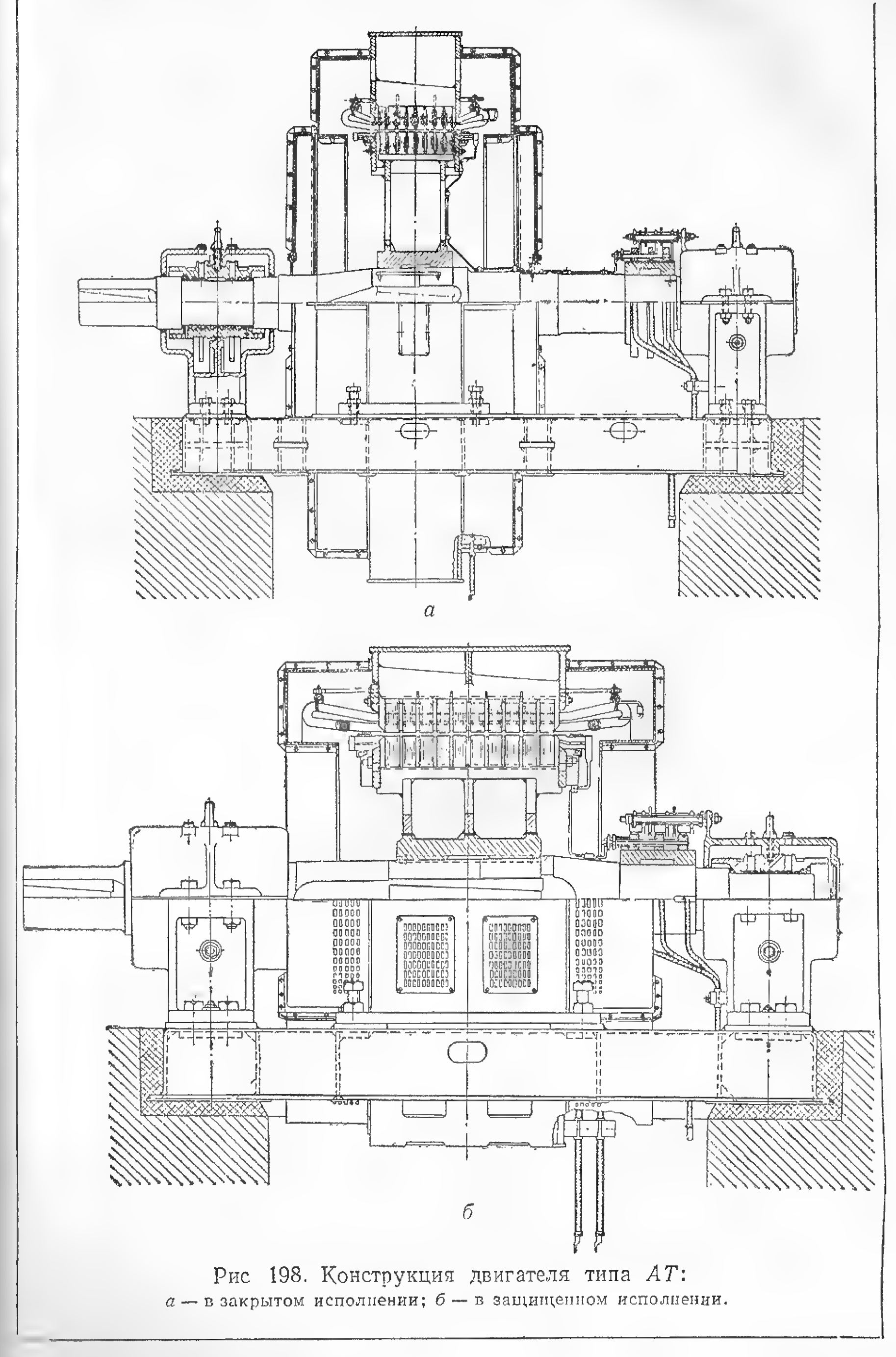



Рис 198. Конструкция двигателя типа *АТ*:
*а* — в закрытом исполнении; *б* — в защищенном исполнении.

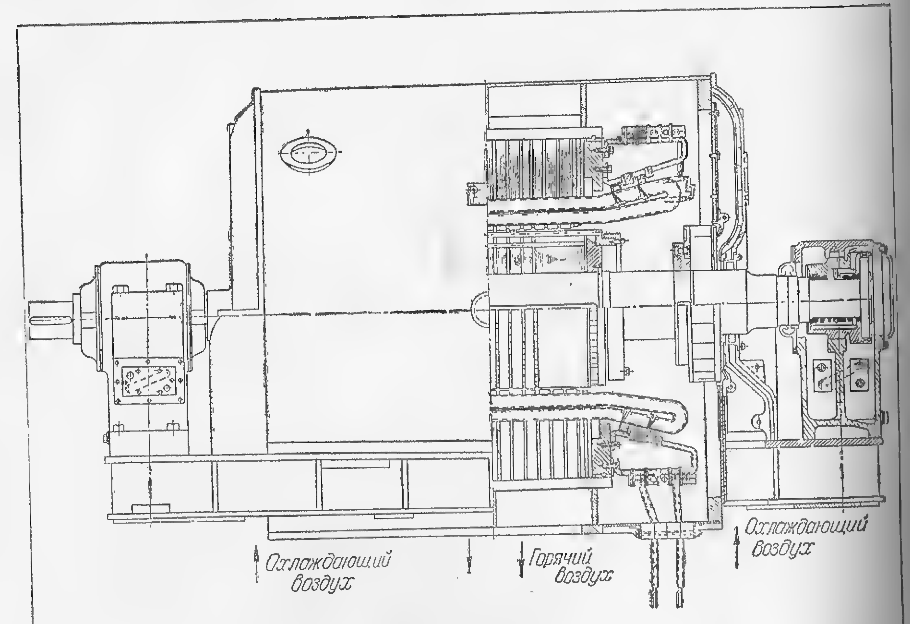



Рис. 199. Конструкция электродвигателя *АТМ*-2000-2.

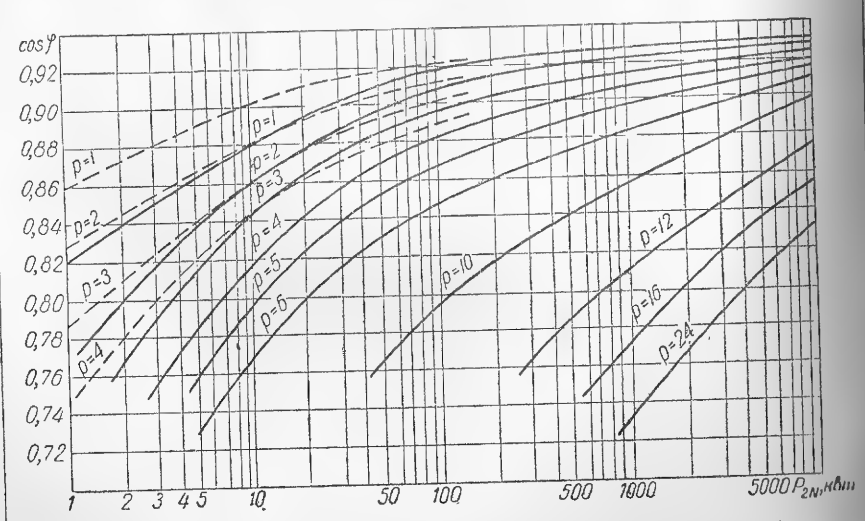



Рис. 200. Коэффициенты мощности асинхронных двигателей в функции мощности для различного числа пар полюсов:
— — — с короткозамкнутым ротором; ——— с фазным ротором.



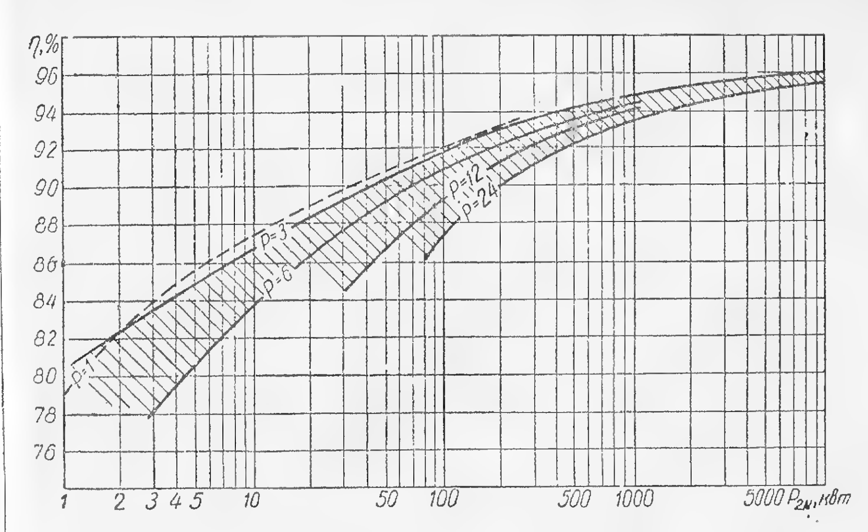



Рис. 201. К. п. д. асинхронных двигателей в функции мощности для различного числа пар полюсов
(— — — — ротор короткозамкнутый; ——— ротор фазный).

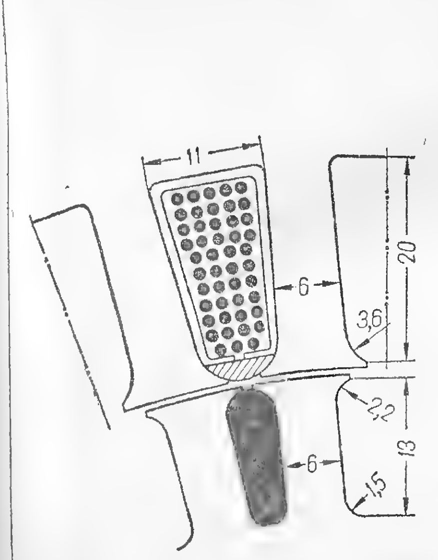



Рис. 202. Пазы статора и ротора асинхронного двигателя 5,5 *квт*, 380 *в*, 1500 об/мин: обмотка статора — всыпная; обмотка ротора — заливка алюминием.

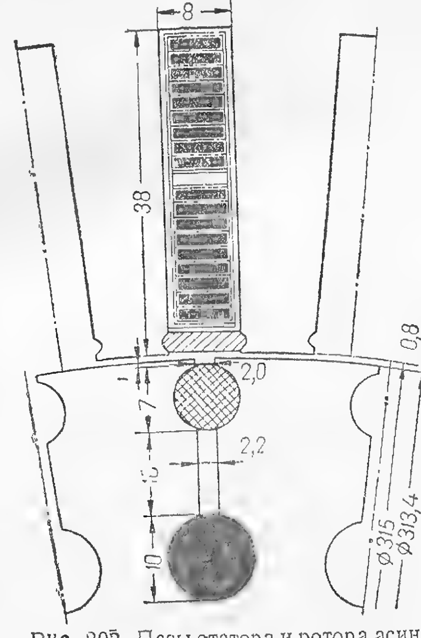



Рис. 203. Пазы статора и ротора асинхронного двигателя с двойной клеткой, 100 *квт*, 500 *в*, 1500 об/мин.

В однофазных двигателях применяются однофазные обмотки с обмотанной частью $^2/_3$ от полюсного деления.

Жести ротора набираются в пакеты, а затем напрессовываются на вал; в больших машинах на вал насаживается переходная втулка с каналом для вентиляции, а на нее напрессовываются жести.

В пазах пакетов ротора располагают роторную обмотку. Существует два основных типа роторов асинхронных машин:

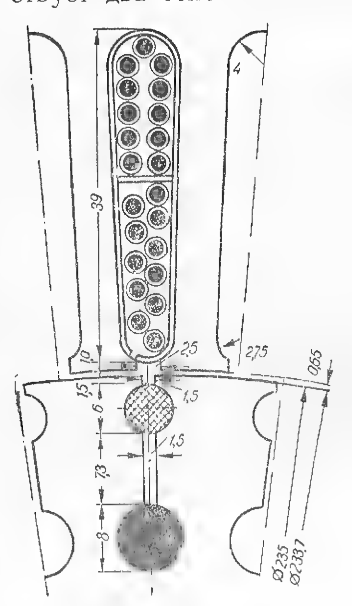


Рис. 204. Пазы статора и ротора полюсопереключаемого асинхронного двигателя 12/20 *квт*, 2*p*-8/4.

1. Фазный ротор, у которого трехфазная обмотка выполнена из круглой или прямоугольной меди. Концы обмотки выведены к контактным кольцам, соединенным через щетки с пусковым реостатом. Роторные обмотки крупных машин выполняют волновыми двухслойными, стержневыми или катушечными. В машинах до 100 *квт* делают также петлевые обмотки. Число пазов на полюс и фазу выгодно выбрать на 1 или 2 меньше, чем в статоре.

2. Короткозамкнутый ротор четырех основных типов:

а) с одинарной беличьей клеткой (рис. 202; 219, *а* и 237). В пазы ротора заложены медные, латунные или алюминиевые стержни. Торцовые части стержней приварены к кольцам. В двигателях малой и средней мощности беличья клетка выполняется путем заливки алюминия в пазы с одновременной отливкой торцовых колец, на которых отливаются и лопасти вентиляторов;

б) глубокопазный (рис. 219, *б* и 239). Данная конструкция подобна предыдущей, с той разницей, что здесь соотношение высоты паза к его ширине составляет 5 : 1 и более. Такая конструкция ротора обеспечивает более высокие пусковые моменты при меньших кратностях пускового тока;

в) двухклеточный (рис. 203, 204, 219, *в*). Ротор имеет две беличьи клетки: верхнюю — пусковую — с относительно большим активным и малым индуктивным сопротивлениями, выполненную из круглых латунных или бронзовых стержней, и нижнюю — рабочую — с минимальным активным и относительно большим индуктивным сопротивлениями, выполненную из прямоугольных или круглых медных стержней. К торцам пусковой и рабочей обмоток привариваются короткозамыкающие кольца, которые могут соединять обе обмотки, но могут быть и изолированы друг от друга.

Между пазами верхней и нижней клеток существует щель, размеры которой оказывают существенное влияние на вторичный поток рассеяния, а следовательно, и на характеристику двигателя;



г) ротор с фигурными пазами (рис. 226) обладает преимуществом перед двухклеточным благодаря бóльшей надежности клетки (высокая механическая прочность, бóльшая теплоемкость и соответственно меньшие нагревы при пуске).

Двухклеточный и фигурнопазный роторы применяются в средних и крупных двигателях.

В двигателях малой мощности вместо стержней в пазы ротора может быть залит алюминий. В этом случае и щель между верхней и нижней клетками будет заполнена алюминием. Получим конструкцию двигателя с глубоким фигурным пазом (рис. 219, *в*). Поэтому такую конструкцию можно рассматривать как промежуточную между двухклеточным двигателем и глубокопазным.

В о з д у ш н ы й з а з о р. В целях увеличения $\cos\varphi$ воздушный зазор в асинхронном двигателе должен быть по возможности меньшим. В современных машинах в зависимости от мощности и условий работы величина воздушного зазора колеблется в пределах: в мелких машинах 0,25—0,5, в средних машинах 0,6—1,5, в крупных 1,5—5 *мм* и выше.

Величина минимально допустимого воздушного зазора определяется: а) начальным эксцентриситетом ротора, б) износом подшипников, в) силой одностороннего магнитного притяжения и прогибом вала, г) допустимой величиной дифференциального рассеяния и коэффициента Картера, д) величиной дополнительных потерь.

Чаще всего электродвигатели применяются в таких условиях, когда приводимый механизм имеет выступающий конец вала, с которым может быть связан двигатель либо непосредственно, либо с помощью какой-либо передачи. Двигатели применяются в большинстве случаев с двумя подшипниковыми щитами или двумя подшипниковыми опорами. Если же по каким-либо причинам могут возникать недопустимые по величине нагрузки на подшипниковые опоры, то добавляется третья подшипниковая опора. Мощные тихоходные двигатели выполняются с отдельными стояковыми подшипниками на общей фундаментной плите. В зависимости от характера привода и места расположения электродвигателя исполнение двигателя может быть горизонтальное, вертикальное или наклонное [1].

Асинхронную машину характеризуют следующие основные данные:

1) мощность (*вт, квт, л. с.*) (продолжительная, кратковременная, повторно-кратковременная);

2) напряжение (*в, кв*);

3) скорость вращения синхронная или номинальная (об/мин, об/сек);

4) тип исполнения (закрытый, защищенный, тип ротора и т. п.);

5) коэффициент мощности ($\cos\varphi$);

6) коэффициент полезного действия и номинальное скольжение;

7) частота питающего тока.

Асинхронная машина характеризуется, кроме того, эксплуатационными данными:

1) максимальным моментом $M_{max}$;

2) пусковым моментом $M_п$;

3) пусковым током $I^п$;

4) графиком и характером нагрузки, пределами регулирования скорости и т. д.

Мощности асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели выполняются на самые различные мощности:

а) до 0,6 *квт* — микромашины,

б) от 0,6 до 10 *квт* — малые машины,

в) от 10 до 100 *квт* — средние машины,

г) свыше 100 *квт* — крупные машины.

Микромашины и отчасти малые машины по закономерностям в значительной степени выходят за пределы нормальных типов и требуют специального рассмотрения [31], [13], [132].

Крупные машины изготовляются обычно для приводов прокатных станов, вентиляторов, подъемников шахт и гребных винтов кораблей. Построены асинхронные двигатели мощностью до 30 000 *квт* и выше. Крупные двигатели выпускаются в порядке индивидуальных заказов или мелкими сериями, более мелкие — изготовляются крупносерийным производством.

Напряжения асинхронных машин и изоляция. Асинхронные машины могут быть построены на самые различные напряжения. Однако пределы напряжений для машин данной мощности определяются экономическими и техническими соображениями. Так, при повышении напряжения возрастает толщина изоляции, уменьшается заполнение паза медью, уменьшаются допустимые плотности тока, а габариты, стоимость материалов машины и стоимость изоляции возрастают. Кроме того, уменьшается надежность машины в эксплуатации по условиям пробоя изоляции. При уменьшении рабочего напряжения возрастает величина тока двигателя, что приводит к удорожанию питающей сети (по стоимости материала и стоимости потерь), к удорожанию аппаратуры, а также к затруднениям конструктивного характера при выполнении машины. Поэтому для определенного диапазона мощностей существует оптимальный диапазон напряжений. Для мелких и средних машин обычно применяют стандартные напряжения: 127, 220, 380, 500, 660 *в*; для средних и крупных: 3000—6000—10 000 *в*.

В приложении V даны типы изоляции обмоток высоковольтных и низковольтных машин.

Скорости вращения. Скорость вращения асинхронной машины при проектировании может быть задана из условий привода или может подлежать выбору.

Синхронная скорость связана с частотой сети *f* *гц* по закону $n = \frac{f}{p}$, где $p$ — число пар полюсов машины; $n$ — об/сек.

При частоте $f = 50$ *гц* синхронные скорости вращения мелких и средних машин обычно находятся в пределах 750—3000 об/мин. Крупные машины выполняются на меньшие скорости вращения. Имеются, однако, и крупные быстроходные машины, например турбомоторы для привода мощных компрессоров или воздуходувок. При повышении частоты питающего тока при $p = 1$ можно получить



скорость больше 3000 об/мин. Для приводов, требующих высоких скоростей, были построены асинхронные машины на повышенные скорости вращения (6000 об/мин; 30 000 об/мин). Однако в соответствии с формулой (9 а) гл. 10 мощность машины должна снижаться с возрастанием скорости. Кроме того, для питания таких машин требуется установка преобразователей частоты.

В настоящее время в Советском Союзе существует ряд серий асинхронных машин. Сокращенные сведения об этих сериях приводятся в табл. 60, 61, 62, 68. Для удобства пользования в каталогах различные типы асинхронных двигателей представлены в зашифрованном виде. Принцип зашифровки серий и типов двигателей примерно один и тот же.

*Таблица 60*

**Шкала мощностей в *квт* двигателей серии А (до 9-го габарита)**

| Габарит | Защищенное исполнение | | | | Закрытое обдуваемое исполнение | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Мощность при | | | | Мощность при | | | |
| | $2p=2$ | $2p=4$ | $2p=6$ | $2p=8$ | $2p=2$ | $2p=4$ | $2p=6$ | $2p=8$ |
| 3-й | 1,0 | 0,6 | — | — | 0,6 | 0,6 | — | — |
| | 1,7 | 1,0 | — | — | 1,0 | 1,0 | — | — |
| 4-й | 2,8 | 1,7 | 1,0 | — | 1,7 | 1,7 | 1,0 | — |
| | 4,5 | 2,8 | 1,7 | — | 2,8 | 2,8 | 1,7 | — |
| 5-й | 7,0 | 4,5 | 2,8 | — | 4,5 | 4,5 | 2,8 | — |
| | 10 | 7,0 | 4,5 | — | 7,0 | 7,0 | 4,5 | — |
| 6-й | 14 | 10 | 7,0 | 4,5 | 10 | 10 | 7,0 | 4,5 |
| | 20 | 14 | 10 | 7,0 | 14 | 14 | 10 | 7,0 |
| 7-й | 28 | 20 | 14 | 10 | 20 | 20 | 14 | 10 |
| | 40 | 28 | 20 | 14 | 28 | 28 | 20 | 14 |
| 8-й | 55 | 40 | 28 | 20 | 40 | 40 | 28 | 20 |
| | 75 | 55 | 40 | 28 | 55 | 55 | 40 | 28 |
| 9-й | 100 | 75 | 55 | 40 | 75 | 75 | 55 | 40 |
| | 130 | 100 | 75 | 55 | 100 | 100 | 75 | 55 |

Название серии или типа двигателя, характер установки (на лапах или фланцевая) обозначается буквами. В дробных числах первая цифра числителя, следующая непосредственно после буквенного обозначения серии, условно характеризует постепенно возрастающий наружный диаметр статорных листов. Вторая цифра числителя обозначает условную длину сердечника. Знаменатель обозначает число полюсов.

Например, АДФ 41/4 : А — асинхронный, Д — двигатель, Ф — фланцевый, четвертого габарита серии АД, первой длины, четырехполюсный. Для глубокопазных двигателей в шифр войдет буква Г, для двигателей с двойной клеткой буква Д, а вместо Д — двигатель будет стоять М — мотор.

Приведенные ниже серии конструировались различными предприятиями, независимо друг от друга. Это приводило к неувязке целого ряда параметров (не предусмотренных ГОСТ). Монтажные размеры двигателей, близких по мощности для разных серий,

**Данные электродвигателей с фазным ротором**

| Номинальная мощность на валу (в *квт*) | Напряжение (в *в*) | Скорость вращения (в об/мин) | К. п. д. (в проц.) | cos φ | Данные ротора: Напряжение (в *в*) | Данные ротора: Сила тока (в *а*) | $\frac{M_{max}}{M_N}$ | Вес (в *кг*) | Маховой момент ротора (в *кг·м²*) | Тип электродвигателя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,8 | 127—500 | 1370 | 80,0 | 0,84 | 84 | 22,5 | 2,0 | 84 | 0,19 | АК51—4 |
| 7,0 | » | 1400 | 82,0 | 0,84 | 144 | 33,5 | 2,0 | 125 | 0,45 | АК60—4 |
| 20,0 | » | 1420 | 87,0 | 0,86 | 193 | 68.0 | 2,3 | 235 | 1,10 | АК71—4 |
| 40,0 | » | 1440 | 89,0 | 0,87 | 336 | 74,0 | 2,6 | 400 | 2,50 | АК81—4 |
| 75,0 | » | 1460 | 90,5 | 0,88 | 383 | 115,0 | 2,8 | 640 | 6,20 | АК91—4 |
| 100,0 | » | 1460 | 91,0 | 0,88 | 520 | 117.0 | 3,0 | 710 | 7,60 | АК92—4 |
| 1,7 | » | 905 | 75.0 | 0,73 | 57 | 20,2 | 2,0 | 82 | 0,19 | АК51—6 |
| 4,5 | » | 925 | 78.0 | 0.76 | 117 | 26.0 | 1,8 | 125 | 0,75 | АК60—6 |
| 14,0 | » | 950 | 84,5 | 0,81 | 157 | 63,0 | 1,8 | 235 | 1,70 | АК71—6 |
| 55,0 | » | 970 | 89,5 | 0,84 | 390 | 88,0 | 2,3 | 640 | 10,80 | АК91—6 |
| 75,0 | » | 970 | 90,0 | 0,85 | 538 | 88,0 | 2,5 | 710 | 13,50 | АК92—6 |
| 4,5 | » | 700 | 78,0 | 0,73 | 126 | 24,0 | 1,8 | 145 | 0,95 | АК61—8 |
| 10.0 | » | 700 | 82,5 | 0.76 | 118 | 64,0 | 1,8 | 235 | 1,60 | АК71—8 |
| 20,0 | » | 710 | 85,5 | 0,79 | 230 | 57,0 | 1,9 | 400 | 3,50 | АК81—8 |
| 40,0 | » | 720 | 88,0 | 0,81 | 270 | 92.0 | 2,0 | 640 | 10,40 | АК91—8 |
| 55,0 | » | 720 | 89,0 | 0,82 | 776 | 92.0 | 2,2 | 710 | 13,00 | АК92—8 |
| 21 | 127/220 | 945 | 85,8 | 0.813 | 190 | 76,5 | 1,8 | 286 | 4 | МКМА—79/6 |
| 44 | 220/380 500 | 970 | 87,8 | 0,829 | 382 | 73,5 | 1,8 | 465 | 8,3 | МКМА—22/6 |
| 35 | 220/380 | 730 | 88 | 0,81 | 125 | 188 | 1,8 | 540 | 9,5 | МАК—92/8 |
| 70 | 500 | 1460 | 90,4 | 0,90 | 171 | 261 | 2,2 | 560 | 7,7 | МАК—92/4 |
| 130 | 220/380 | 735 | 88 | 0,78 | 355 | 225 | 2,2 | 1500 | 52 | МАД—126—8 |
| 160 | 220/380 | 735 | 88 | 0,78 | 455 | 225 | 2,2 | 1850 | 64 | МАД—128—8 |
| 65 | 220/380 | 725 | 88,7 | 0,83 | 200 | 220 | 1,8 | 960 | 22,2 | МАШ—64/8 |
| 120 | 380 | 1470 | 91.0 | 0,89 | 310 | 250 | 1,8 | 960 | 20,5 | МАШ—64/4 |
| 240 | 500 | 980 | 92,2 | 0,87 | 520 | 305 | 1,8 | 1420 | 81 | МАШ—85/6 |
| 45 | 220/380 | 575 | 87.5 | 0,76 | 136 | 220 | 1,8 | 1040 | 25 | АМ6—115—10 |
| 215 | 380 | 980 | 93,5 | 0,89 | 288 | 453 | 1,8 | 1770 | 54 | АМ6—128—6 |
| 410 | 3000 | 1480 | 93 | 0,89 | 540 | 485 | 2,3 | 2300 | 71 | АМ6—138—4 |
| 275 | | | 88,5 | 0,68 | 575 | 330 | 2,1 | 7150 | 2000 | ДА—170/24—20 |
| 600 | 6000 | — | 90,5 | 0,80 | 585 | 700 | 1,8 | 11200 | 6200 | ДА—213/24—20 |
| 1000 | 3000 | | 92,0 | 0,78 | 800 | 830 | 2,0 | 14400 | 7900 | ДА—213/39—20 |
| 900 | | | 91,2 | 0,70 | 760 | 795 | 2,15 | 19000 | 10000 | ДАП—213/49—24 |
| 1850 | 6000 | — | 93,2 | 0,83 | 965 | 1190 | 3,2 | 23500 | 14500 | ДАП—213/69—16 |

существенно отличались друг от друга. Вследствие большого числа серий и типоразмеров нельзя было применять стандартные размеры и материалы для аналогичных деталей. Такое положение сильно затрудняло выбор, замену и ремонт двигателей.

Стремление к увеличению количества выпускаемых двигателей на основе массово-поточного производства с применением специализированного оборудования и новейших технологических процессов привело к необходимости переконструирования существующих серий и создания единой серии с унифицированной шкалой мощности и монтажных размеров. Серия А включает в себя двигатели: а) от 0,05 до 0,6 *квт* (микромашины); б) от 0,6 до 100 *квт* (от 3-го до





**Данные короткозамкнутых электродвигателей**

| Номинальная мощность на валу (в *квт*) | Напряжение (в *в*) | При номинальной нагрузке: Скорость вращения (в об/мин) | При номинальной нагрузке: К. п. д. (в проц.) | При номинальной нагрузке: cos φ | $\frac{I_п}{I_N}$ | $\frac{M_п}{M_N}$ | $\frac{M_{max}}{M_N}$ | Вес (в *кг*) | Маховой момент ротора (в *кгм²*) | Тип электродвигателя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,18 | 127/220 | 2800 | 66,0 | 0,86 | 5.0 | 2,0 | 2,2 | — | — | АОЛ11—2 |
| 1,0 | 127/220/380; 500 | 2850 | 79,0 | 0,86 | 5,5 | 1,8 | 2,2 | 17 | 0,008 | А31—2 |
| 4,5 | » | 2870 | 85,5 | 0,88 | 6.0 | 1,8 | 2,4 | 42 | 0,034 | А42—2 |
| 14,0 | 220/380; 500 | 2920 | 87,5 | 0,89 | 5,5 | 1,2 | 2,5 | 130 | 0,27 | А61—2 |
| 40,0 | » | 2930 | 90,0 | 0,91 | 5,5 | 1,1 | 2,4 | 235 | 0,73 | А72—2 |
| 125,0 | » | 2950 | 92,0 | 0,92 | 5,5 | 1,0 | 2,2 | 685 | 4,30 | А92—2 |
| 0,12 | 127/220 | 1400 | 58,0 | 0,72 | 4,0 | 1,8 | 2,0 | — | — | АОЛ11—4 |
| 0,6 | 127/220/380; 500 | 1410 | 74,0 | 0,76 | 5,0 | 1,7 | 2,0 | 17 | 0,013 | А31—4 |
| 1,7 | » | 1420 | 81,5 | 0,82 | 5,0 | 1,8 | 2,0 | 34 | 0,042 | А41—4 |
| 4,5 | » | 1440 | 85,5 | 0,85 | 6,0 | 1,4 | 2,0 | 70 | 0,17 | А51—4 |
| 20,0 | 220/380; 500 | 1450 | 89,0 | 0,88 | 5,0 | 1,1 | 2,0 | 205 | 0,95 | А71—4 |
| 55,0 | » | 1460 | 91,0 | 0,89 | 6,0 | 1,2 | 2,0 | 400 | 2,50 | А82—4 |
| 1,7 | 127/220/380; 500 | 930 | 79,5 | 0,75 | 4,5 | 1,4 | 1,8 | 42 | 0,06 | А42—6 |
| 20,0 | 220/380 ; 500 | 970 | 88,0 | 0,84 | 4,5 | 1,2 | 1,8 | 230 | 1,90 | А72—6 |
| 75,0 | » | 980 | 92,0 | 0,88 | 5,0 | 1,0 | 1,8 | 665 | 9.20 | А92—6 |
| 4,5 | » | 730 | 83,5 | 0,76 | 4,5 | 1,0 | 1,7 | 125 | 0,70 | А61—8 |
| 55,0 | » | 730 | 91,0 | 0,84 | 4,5 | 1,1 | 1,7 | 665 | 9,20 | А92—8 |
| 15 | | 730 | 86,9 | 0,82 | 4,1 | 1,1 | 1,7 | 236 | 2,4 | МА—81/8/МА—8 |
| 35 | 220/380 500 | 980 | 89,0 | 0,87 | 6,0 | 1,1 | 2,2 | 372 | 5,7 | МА—91/6/МА—9 |
| 70 | | 1470 | 90,4 | 0,91 | 6,5 | 1,4 | 2,3 | 450 | 5,6 | МА—92/4 |
| 2,7 | 220/380 | 720 | 80,5 | 0,70 | 5,0 | 1,2 | 1,8 | 138 | 0,35 | МА—142—1/8 |
| 46 | 500 | 980 | 89,5 | 0,84 | 6,5 | 2,1 | 2,2 | 720 | 12,4 | МА—146—1/6 |
| 85 | | 1480 | 90,0 | 0,83 | 6,5 | 2,1 | 2,2 | 820 | 11,4 | МА—146—2/4 |
| 17 | 220/380 | 1485 | 90,0 | 0,84 | 7,5 | 2,2 | 2,3 | 505 | 2,8 | МА—173—2/4 |
| 25 | | 1470 | 87,0 | 0,64 | 9,0 | 3,7 | 5,0 | 600 | — | МА—191/3М |
| 47 | 220/380 | 1400 | 87,0 | 0,81 | 4,5 | 2,2 | 1,8 | 1000 | — | МА—191/8 |
| 45 | 220/380 | 575 | 87,5 | 0,77 | 4,5 | 1,3 | 2,0 | 920 | 24 | ГАМ—6—115—10 |
| 210 | 380 | 735 | 92 | 0,86 | 4,5 | 1,0 | 1,8 | 1830 | 89 | ДАМ—6—137—8 |
| 410 | 3000 | 1480 | 93 | 0,87 | 5,2 | 1,4 | 1,9 | 220 | 66 | ДАМ—6—138—4 |
| 65 | 3000/3150 | 735 | 88 | 0,77 | 4,4 | 1,4 | 1,9 | 1250 | 47 | ДАМТ—125—8 |
| 180 | 3000/3150 | 985 | 91 | 0,85 | 5,2 | 1,3 | 2,0 | 1600 | 54 | ДАМТ—128—6 |
| 340 | 3000/3150 | 1460 | 93 | 0,88 | 5,4 | 1,4 | 2,0 | 2200 | 66 | ДАМТ—138—4 |
| 750 | | | 93,8 | 0,88 | 5,0 | 0,75 | 1,85 | 8500 | 2200 | ДДП—140/49—10 |
| 350 | 6000 | | 94,0 | 0,90 | 4,6 | 0,76 | 8,51 | 9500 | 1100 | ДДП—140/49—6 |

9-го габарита); в) двигатели свыше 100 *квт*. Основная часть серии запроектирована в виде двух параллельных рядов: нормальные защищенные электродвигатели с внутренней вентиляцией и закрытые двигатели с внешним обдувом [58].

Кратность пускового тока двигателей серии А ниже, а кратности пускового и максимального моментов выше, чем устанавливалось по ГОСТ для предыдущих серий.

Следует обратить внимание на то, что двигатели серии А обладают значительным тепловым запасом по статору.

Начальная скорость возрастания температуры обмотки статора при коротком замыкании и номинальном напряжении сети может быть определена из выражения $\Delta\theta = \frac{s_a^2}{175}$ °С/сек, где $s_a$ — плотность тока в обмотке статора при коротком замыкании, *а/мм²*.

Эта величина для двигателей 3-го, 4-го и 5-го габаритов равна 2—5° С/сек и для двигателей 6-го, 7-го, 8-го и 9-го габаритов 1,5—7° С/сек, что в 2—3 раза меньше, чем у двигателей предыдущих серий.

Большинство двигателей серии имеют короткозамкнутый ротор с алюминиевой заливкой и глубоким пазом (25—40 *мм*) овальной или прямоугольной формы. Некоторое количество двигателей выполняется с фазным ротором (тип АК). Двигатели закрытого исполнения имеют ребристый корпус с внешним обдувом. Напряжение обмотки статора 127/220 или 220/380 и 500 *в*. Паз статора полузакрытый и полуоткрытый; обмотка с мягкими секциями укладывается через щель паза. Проводники — марки ПБД, ПЭЛБО и др., изоляция класса А (в особых случаях классов *F* и *H*, см. приложение V).

Серия малых электродвигателей АОЛ (трехфазного) и АОЛБ (однофазного тока). Мощности от 5 до 600 *вт*, коэффициент нарастания мощностей от 1,5 до 2. Серия (начиная с 50 *вт*) базируется на трех диаметрах 84, 102 и 120 *мм*. Каждый типоразмер имеет две скорости: 1500 и 3000 об/мин. Исполнение—закрытое, обдуваемое. Корпус, щиты и крышки отливаются под давлением из алюминиевого сплава. Серия развита на меньшие мощности ниже 50—80 *вт* при 3000 об/мин и диаметрах 70, 56 и 44 *мм*. При этом охватывается диапазон 5 *вт* для однофазных и 18 *вт* для трехфазных. Напряжения: 127, 220, 380 и 24, 36 *в*.

Единая серия асинхронных машин от 100 до 1000 *квт*. Отрезок серии А и АК (ротор с кольцами) от 100 до 400 *квт* на двух габаритах: 10-м ($D_a$ — 590 *мм*) и 11-м ($D_a$ — 740 *мм*). До 500 *в* применяются полуоткрытые пазы и корпусная изоляция в виде одного слоя коробочки из электрокартона, одного слоя стеклоэскапоновой лакоткани и одного слоя пленкоэлектрокартона. Имеется модификация с открытым пазом и непрерывной компаундированной влагостойкой изоляцией (см. приложение V). При 3000 и 6000 *в* применяются открытые пазы и непрерывная компаундированная влагостойкая изоляция. Фазные роторы выполняются со стержневой двухслойной волновой обмоткой, с диаметральным шагом и полузакрытым пазом. Стержни изолируются эскапоновым стеклофолием.

Короткозамкнутые роторы с медной клеткой фигурного профиля имеют короткозамкнутые медные кольца. Стержни впаиваются меднофосфористым припоем. Имеются модификации роторов с алюминиевой заливкой.



Из специализированных серий можно привести следующие примеры. Серия АР для привода рольгангов. Особенности серии — высокие пусковые качества, необходимые при повторно-кратковременных режимах, большом числе включений в час и при необходимости разгона больших масс (роликов и прокатываемого изделия). Скорости вращения от 300 до 1500 об/мин. Установлена твердая шкала пусковых моментов (вместо твердой шкалы мощностей): 1,4; 2,4; 4,5; 7, 10; 20; 28; 40 и 55 *кгм*. Двигатели допускают динамическое торможение и торможение противотоком. Обмотка статора из мягких секций, закладываемых через щели полузакрытых пазов, имеет стеклянную изоляцию провода. В качестве изоляционных материалов применяется слюда и стекловолокно с кремнийорганическими лаками. Обмотанные статоры подвергаются трехкратной пропитке в кремнийорганическом лаке. После пропитки лобовые части дважды покрываются теплостойкой покровной эмалью печной сушки. Пазовые клинья изготовляются из стеклотекстолита. Корпуса — ребристые без внешнего обдува.

Серия ПЭД (17; 35; 46,5; 10 и 18 *квт*) включает погружные короткозамкнутые двигатели для насосов нефтяных скважин. Двигатель соединен непосредственно с насосом в общий агрегат. Двигатель мощностью 35 *квт* имеет диаметр 125 *мм* и длину 5550 *мм*. Изоляция обмотки статора — стекломиканитовая. Между роторными пакетами на валу устанавливаются подшипники качения.

Двигатели серии МАПЗ предназначены для артезианских скважин: МАПЗ-14, МАПЗ-21,9, МАПЗ-18, МАПЗ-27,3 соответственно мощностью 2,5; 35; 12 и 60 *квт*. Скорость вращения 2880 об/мин. Охлаждение и смазка электродвигателей осуществляются водой, находящейся в скважине. Для обмотки статора применяется обмоточный провод с полихлорвиниловой изоляцией, обладающей высокой водостойкостью. Удовлетворительная работа подшипников при водяной смазке достигнута за счет специального подбора трущихся материалов шейки и втулок.

Асинхронные генераторы и компенсаторы. Асинхронные генераторы и компенсаторы нашли незначительное распространение, так как требуют особого рода возбуждения, например: а) возбуждение со стороны статора, б) возбуждение со стороны статора и ротора, в) самовозбуждение.

Первый способ требует работы асинхронных генераторов параллельно с синхронными машинами, второй и третий способы связаны с рядом трудностей (стабилизация частоты и т. д.). Применение первых двух способов в отдельных случаях может быть выгодным; однако условия эксплуатации асинхронных генераторов в системе совместно с синхронными не получили еще надлежащего изучения как в теории, так и на практике.

В качестве асинхронных генераторов и компенсаторов применяются обычные типы асинхронных двигателей (большой мощности). В качестве возбудителей асинхронных компенсаторов используются коллекторные машины переменного тока.

Технические требования по ГОСТ 183—55:

1. *Номинальные режимы работы электрических машин:* а) продолжительный, б) кратковременный (15, 30, 60 и 90 мин.), в) повторно-кратковременный ПВ—15, 25, 40 и 60% (продолжительность цикла не выше 10 мин.).

2. *Кратности начального пускового момента и минимального момента в процессе пуска трехфазных короткозамкнутых двигателей более 100 квт:* а) у двигателей с $n \leqslant 1500$ об/мин, имеющих отношение $\frac{P}{n} \leqslant 1$ и у двигателей с $n = 3000$ об/мин при $\frac{P}{n} \leqslant 0,1$ $M_п$ не ниже 0,9 $M_N$ и $M_{\min}$ не ниже 0,6 $M_п$, но не ниже 0,8 $M_N$; б) у двигателей с $n \leqslant 1500$ об/мин при $\frac{P}{n} > 1$ и с $n = 3000$ об/мин при $\frac{P}{n} > 0,1$ $M_п$ не ниже 0,7 $M_N$ и $M_{\min}$ не ниже 0,8 $M_п$, но не ниже 0,6 $M_N$.

3. *Кратность максимального вращающего момента в трехфазных асинхронных двигателях более 100 квт:* а) для двигателей с фазным ротором при $p = 1$ и $p = 2$ — не ниже 1,9 $M_N$; при $p = 3$ и $p = 4$ — не ниже 1,8; при $p = 5$ — не ниже 1,7; б) для двигателей с короткозамкнутым ротором выше 100 *квт*; при $p = 1$ и мощности до 250 *квт* — не ниже 1,8; при $p = 1$ и мощности более 250 *квт* — не ниже 1,7; при $p = 2$, 3 и 4 — не ниже 1,8; при $p = 5$ — не ниже 1,7 $M_N$.

4. *Допустимые отклонения:* а) для $\cos\varphi$ в сторону уменьшения — $\frac{1 - \cos\varphi}{6}$; б) для к. п. д. для машин до 50 *квт* в сторону уменьшения 0,15 $(1 - \eta)$; для машин выше 50 *квт* — 0,1 $(1 - \eta)$ при $\eta \leqslant 0,95$; в) скольжение + 25%: г) пусковой ток + 15%; д) пусковой момент (— 20%); е) максимальный момент (— 10%).

## 11-2. ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ

Обычно проектное задание включает следующие данные:

1. Мощность (продолжительная, повторно-кратковременная и т. д.).
2. Назначение двигателя.
3. Скорость вращения, скольжение.
4. Напряжение и частота.
5. Конструктивный тип (закрытый, защищенный, тип ротора и т. д.).
6. Коэффициент мощности (задается или подлежит выбору).
7. Коэффициент полезного действия (задается или подлежит выбору).
8. Кратность максимального момента.
9. Кратность пускового момента.
10. Кратность пускового тока.
11. График и характер нагрузки, пределы регулирования скорости и т. д.
12. Сопряжение фаз.



## 11-3. ВЫБОР К. П. Д. и cos φ

К. п. д. можно выбрать, исходя из существующих норм. Согласно гл. 2 существует экономический к. п. д. для машины любой мощности и скорости вращения. Однако определение его связано с известными трудностями. По исследованиям автора, отношение электрических потерь (в меди и железе) к полной мощности имеет вполне определенное, оптимальное значение:

$$\frac{\Sigma p}{P} = k_э \left(\frac{2p}{P}\right)^{\frac{1}{4}}, \qquad (1)$$

где

$$k_э \to \text{const} \approx (1 \ вт)^{\frac{1}{4}},$$

если $P$ выражено в *вт*.

Так, например, для машины мощностью 10 000 *квт* при $2p = 2$ получаем

$$\eta_{эл} = 1 - \left(\frac{2}{10\,000\,000}\right)^{\frac{1}{4}} = 0,978.$$

По данным построенных машин для такой мощности и скорости вращения должно быть $\eta = 96,5\%$. Учитывая механические потери, получаем вполне удовлетворительное соответствие. Следовательно, экономический к. п. д. с учетом только электрических потерь (без механических и вентиляционных) может быть оценен по формуле

$$\eta_{эл} \approx 1 - \left(\frac{2p}{P_2}\right)^{\frac{1}{4}},$$

а полный к. п. д.

$$\eta \approx 1 - \left(\frac{2p}{P_2}\right)^{\frac{1}{4}} - \frac{p_m + p_{доб}}{P_2}, \qquad (2)$$

где $p_m + p_{доб}$ — сумма механических и добавочных потерь (§ 2-3).

На рис. 201 представлены опытные кривые к. п. д. различных по мощности и скорости вращения машин.

Распределение потерь. Максимум к. п. д. при номинальной нагрузке получится при равномерном распределении постоянных и переменных потерь. К постоянным потерям относятся потери в железе, механические и вентиляционные (при $n = \text{const}$), к переменным — потери в меди. В крупных машинах постоянные потери могут быть весьма велики и поэтому при равенстве постоянных и переменных потерь получились бы весьма большие суммарные потери и низкий к. п. д.; поэтому в крупных машинах иногда постоянные потери значительно превышают потери в меди. В асинхронных машинах малой и средней мощности ввиду относительной малости постоянных потерь, а также с учетом того, что машина может работать с недогрузкой, иногда выгодно выбрать переменные потери несколько больше постоянных.

Основные потери в железе при нормальной нагрузке имеют место главным образом в ярме и зубцах статора. В роторе при

малых скольжениях главную часть потерь в железе составляют пульсационные потери в зубцах. Механические и вентиляционные потери рассчитываются по гл. 5. В малых машинах они составляют незначительный процент общих потерь. В крупных машинах (особенно в быстроходных) эти потери могут составить до 30—40% суммарных потерь.

Разделение переменных потерь между статором и ротором определяется: а) экономическими соображениями, б) требованиями определенных рабочих и пусковых характеристик, в) условиями нагрева. Из экономических условий (если пренебречь намагничивающим током) следует, что потери в меди должны быть распределены между статором и ротором равномерно. Требование повышенного значения кратности пускового момента в короткозамкнутых двигателях приводит к необходимости увеличивать потери в роторе; при этом возрастает номинальное скольжение. Чтобы не получить уменьшения к. п. д., приходится уменьшать потери в статоре и, соответственно, увеличивать вес (стоимость) меди статора. Это может быть также выгодно по условиям нагрева статора, повышенной надежности и перегрузочной способности машины по нагреву.

При выборе коэффициента мощности, как и при выборе к. п. д., в первую очередь необходимо ориентироваться на данные построенных машин (рис. 200, табл. 68) и данные норм. Максимальный $\cos\varphi$ равен

$$(\cos\varphi)_{\max}=\frac{I_{\text{к}i}-I_{\text{ор}}}{I_{\text{к}i}+I_{\text{ор}}}\approx\frac{1}{1+2\frac{I_0}{I_{\text{п}}}}, \qquad (3)$$

где $I_{\text{к}i}=\frac{U}{x_{\text{к}}}\approx I_{\text{п}}$ — идеальный ток короткого замыкания, близкий к задаваемому пусковому току (обычно $I_{\text{п}}\approx(5-6)I_N$; $x_{\text{к}}\approx0{,}3\div0{,}15$);

$I_{\text{ор}}\approx I_{\mu}$ — реактивная составляющая тока холостого хода, близкая к относительному току холостого хода $I_0$.

Так как $\cos\varphi\leqslant(\cos\varphi)_{\max}$, то из формулы (3) можно приближенно оценить величину $I_0$ при известных значениях $\cos\varphi$ и $I_{\text{п}}$.

При окончательном выборе $\cos\varphi$ должны быть приняты в соображение данные заводских каталогов для машин данного типа, а также характер нагрузки машины, задаваемые максимальные моменты и т. д.

Из рис. 200 видно, что $\cos\varphi$ уменьшается с увеличением числа полюсов машины. Это уменьшение $\cos\varphi$ связано с ростом относительной величины намагничивающего тока.

## 11-4. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ

Выбор основных размеров можно произвести по общему методу, изложенному в гл. 2 с последующей проверкой на нагрев. Во всех случаях целесообразно рассчитать несколько вариантов с различными геометрическими отношениями. Оптимальное отношение полюсного деления к длине машины $\beta=\frac{\tau}{l_i}$ можно определить по § 2-5 или по рис. 205, *а*. Полюсное деление по гл. 2



$$\tau=C_s\left(\frac{P_N\,\beta}{2p\sqrt{2}f\,\lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}}, \qquad (4)$$

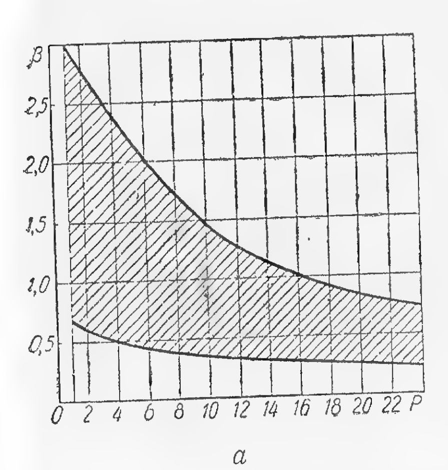
где $\lambda_1=\frac{h_{\text{п}}}{\tau}$ — для асинхронных машин находится в пределах 0,1—0,25 (рис. 205, *б* или рис. 8);

$$C_s=(k_w\,k_\varphi s\,B)^{-1/4};\quad k_w\,k_\varphi\approx0{,}08. \qquad (4а)$$

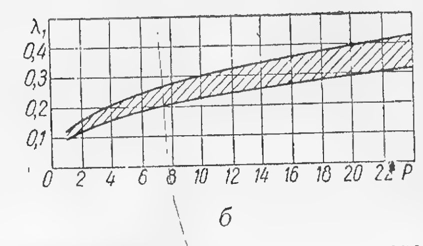
Отношение $\beta=\frac{\tau}{l_i}$ для машин средних и малых мощностей целесообразно выбирать в пределах

$$\beta=\frac{k}{\tau},$$

где $k=18—20$, или по рис. 7.




*а*




*б*

Рис. 205. Области значений коэффициентов $\beta$ (*а*) и $\lambda_1$ (*б*) для асинхронных двигателей в функции числа пар полюсов.

Универсальная машинная постоянная $C_s$ для всех машин нормальных конструкций может быть взята в пределах 3,3—3,8 *см* · $(\text{дж})^{-\frac{1}{4}}$ или определена в зависимости от напряжения по табл. 79. Кроме того, $C_s$ может быть определена по (4а) при выбранных значениях плотности тока $s$ (*а/см²*) и средней индукции в зубцах $B$ (*вб/см²*). Плотность тока выбирается исходя из экономических соображений и соображений нагрева (для нормальных машин в пределах 300—800 *а/см²*, табл. 63). Индукция в зубцах выбирается в пределах 1,2—1,8 *вб/м²*. Оптимальное значение плотности тока и индукции в зубцах можно определить лишь путем расчета ряда вариантов и сравнения их показателей по нагреву и по рабочим характеристикам.

Отношение $\frac{\beta}{\lambda_1}$ согласно сказанному в § 1-6 можно принять для многополюсных машин равным 2,8—3,5 и для быстроходных и мелких машин 4—10. При этом

$$\tau=C_s'\sqrt[4]{\frac{P}{2p}\frac{50}{f}}, \qquad (5)$$

где $C_s'$ соответственно 1,75—2,2 и 2,2—2,5.

Диаметр расточки

$$D = \frac{2p\tau}{\pi}$$

следует округлить в желаемом направлении и учесть возможность использования готовых штампов или нормализованных габаритов (приложение I).

Длина (расчетная)

$$l_i = \frac{\tau}{\beta}.$$

При округлении диаметра необходимо изменить длину $l_i$ так, чтобы величина $D^2 l_i$ осталась неизменной.

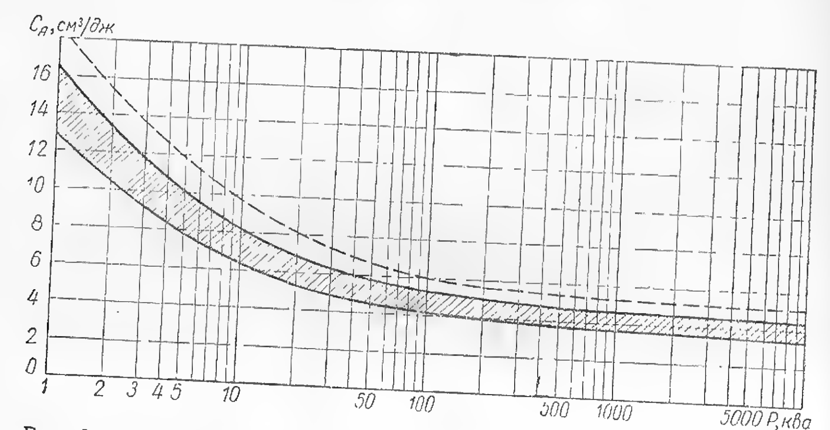



Рис. 206. Постоянная Арнольда для асинхронных двигателей (большие значения для быстроходных двигателей: $p = 1, 2, 3$). Пунктиром показан верхний предел для менее использованных машин.

После определения основных размеров по указанному методу желательно сравнить выбранные размеры с размерами построенных машин, близких по мощности и конструкции (стр. 591).

Проверка соответствия выбранных размеров размерам построенных машин возможна также путем сравнения машинных постоянных

$$C_A = \frac{D^2 l n}{P}.$$

Задаваясь величиной машинной постоянной $C_A$ в соответствии с построенными машинами данного конструктивного типа (рис. 206), получим

$$D = \sqrt[3]{C_A \frac{P 2p\beta}{\pi n}}, \qquad (6)$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad \text{и} \quad l_i = \frac{\tau}{\beta}.$$



*Таблица 63*

**Плотности тока**

| Мощность (в *квт*) | до 1 | 1—10 | 10—100 | 100—1000 | свыше 1000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Плотность тока (в *а/мм²*) | 6—10 (3—5) | 5—8 | 4—7 | 3,5—6,5 | 2,5—5 |

Примечания: 1. При расчете серийных машин следует ориентироваться на умеренные тепловые загрузки (ближе к нижнему пределу). При расчете машин с форсированным охлаждением, например с жидкостным, плотности тока могут быть повышены в 1,5—2 раза.

2. В мелких машинах также иногда приходится брать пониженные плотности тока из условий нагрева или желаемых рабочих характеристик.

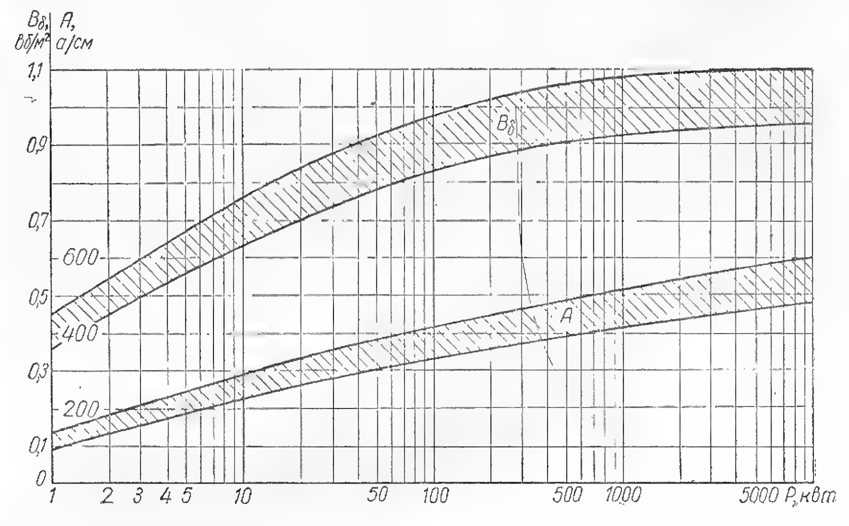



Рис. 207. Индукции в воздушном зазоре и линейные нагрузки для асинхронных двигателей.

При отсутствии опытных данных о величине $C_A$ или при необходимости отступления от этих данных по каким-либо причинам, исходят из желаемых удельных нагрузок, т. е. индукции в воздушном зазоре $B_\delta$ и линейной нагрузки якоря $A$, и определяют величину $C_A$ по формуле

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_w A B_\delta}, \qquad (7)$$

где $A$ и $B_\delta$ принимают по рис. 207. В формуле (7) $B_\delta$ в *вб/см²*.

Выбрав определенное значение $C_A$, находят далее размеры, как это сделано выше. Правильность выбора удельных нагрузок $B_\delta$ и $A$ возможно установить только в результате окончательного расчета, т. е. после определения потерь и к. п. д., температуры обмотки и железа, а также параметров и рабочих характеристик машины.

## 11-5. ЧИСЛО РАДИАЛЬНЫХ ИЛИ АКСИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ И ДЛИНА ЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА

В машинах с радиальной вентиляцией при $D > 49{,}3$ *см* и $l_i > 25$ *см* устраивают радиальные вентиляционные каналы в статоре и в роторе. Машины меньших габаритов или машины с аксиальной системой вентиляции делают без радиальных каналов. При этом обмотки роторов удобно делать с алюминиевой заливкой.

Если число и размеры радиальных каналов статора и ротора одинаковы и каналы не смещены, то расчетная длина железа

$$l_i = l - n_s b_s', \tag{8}$$

где $l$ — полная длина якоря;

$n_s$ — число каналов;

$b_s'$ — расчетная длина канала

$$b_s' = b_s \frac{b_s}{b_s + 5\delta}.$$

Приближенно:

$$l_i = l - 0{,}5 n_s b_s.$$

Иногда для избежания вентиляционного шума в быстроходных машинах каналы делаются смещенными или неравными. Тогда в общем случае при неравных полных длинах статора $l_1$ и ротора $l_2$ и неравных каналах согласно [98]

$$l_i = 0{,}5\,[l_1 + l_2 - (n_{s1} b_{s1}' + n_{s2} b_{s2}')],$$

где

$$b_{s1}' = \frac{b_{s1}^2}{b_{s1} + 5\delta_1}; \qquad b_{s2}' = \frac{b_{s2}^2}{b_{s2} + 5\delta_2};$$

$$\delta_1 = \delta \frac{b_{s1}}{b_{s1} + b_{s2}}; \qquad \delta_2 = \delta \frac{b_{s2}}{b_{s1} + b_{s2}}.$$

Ширина пакета $l'$ выбирается в пределах от 4 до 10 *см*, а ширина канала $b_s$ обычно равна 1 *см*.

Выбрав ширину пакета и число каналов $n_s$, получим

$$l = l_i + 0{,}5 n_s b_s = (n_s + 1) l' + n_s b_s. \tag{9}$$

Длина чистого железа

$$l_{Fe} = (l - n_s b_s) k_п, \tag{10}$$

где $k_п$ — коэффициент заполнения пакета, равный $0{,}92 \div 0{,}93$.

При аксиальной вентиляции $l_i \approx l$. Необходимость аксиальных каналов, их число и размеры устанавливаются при расчете на нагрев (гл. 6).

## 11-6. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

Выбор воздушного зазора в асинхронной машине определяется следующими основными условиями:

1) величиной тока холостого хода и $\cos\varphi$ при номинальной нагрузке;



2) допустимой величиной рассеяния в воздушном зазоре $x_\delta$ (при расчете параметров необходимо обратить внимание на отношение $x_\delta$ к другим составляющим рассеяния);

3) механическими условиями (начальным эксцентриситетом, износом подшипников, односторонним магнитным притяжением и т. д.).

Согласно [150] по технологическим соображениям воздушный зазор нежелательно выбирать меньше величины

$$\delta_{min} = 0{,}1 + 0{,}02\sqrt{Dl}\ мм, \tag{11}$$

где $D$ и $l$ — диаметр и длина якоря, *см*.

Для машин меньше 20 *квт* по [148]

$$\left.\begin{aligned} \delta &\approx \left(\frac{D\ (мм)}{1000} + 0{,}2\right) мм,\ \text{если}\ 2p = 4 \div 12 \\ \delta &\approx \left(\frac{D\ (мм)}{666} + 0{,}3\right) мм,\ \text{если}\ 2p = 2. \end{aligned}\right\} \tag{11а}$$

Для машин выше 30 *квт*

$$\delta \approx \frac{D\ (мм)}{1200}\left(1 + \frac{9}{2p}\right) мм. \tag{11б}$$

Величины практически употребляемых зазоров приведены в табл. 68. Для $p = 1$ целесообразно увеличить зазор на $25 \div 50\%$. Величина воздушного зазора определяет в основном величину тока холостого хода и коэффициента мощности.

Для получения максимального коэффициента мощности при номинальной нагрузке необходимо, чтобы относительный намагничивающий ток был равен относительной реактивности короткого замыкания, т. е.

$$\frac{I_{0р}}{I_N} = \frac{x_к I_N}{U_N} = \boldsymbol{x}_к \approx \frac{I_N}{I_п}. \tag{12}$$

В машинах малой мощности при больших значениях $\frac{I_{0р}}{I_N}$ это требование может привести, однако, к малой величине максимального момента, так как

$$\boldsymbol{M}_{max} = \frac{M_{max}}{M_N'} \approx \frac{1}{2\boldsymbol{x}_к}. \tag{13}$$

Поэтому приходится выбирать

$$\cos\varphi_N < (\cos\varphi)_{max}.$$

В формуле (13) $M_N'$ означает единичный или базовый момент, причем

$$M_N' = \frac{m U_N I_N}{\omega_{1m}} = M_N \frac{1 - s_N}{\cos {}_N \eta_N}, \tag{14}$$

где номинальный момент

$$M_N = \frac{P_{2N}}{\omega_{Nm}} = \frac{P_{2N}}{\omega_{1m}(1 - s_N)}\ дж;$$

$$\omega_{1m} = 2\pi n_1; \quad n_1 = \frac{f_1}{p}\ \text{об/сек}.$$

## 11-7. ОБМОТКА, ПАЗЫ И ВНЕШНИЙ ДИАМЕТР СТАТОРА

При малых мощностях статор выполняется с полуоткрытыми пазами и «насыпной двухслойной обмоткой» с равным шагом. Различные формы пазов статора показаны на рис. 208. Обмотка выполняется из меди круглого сечения (мягкие секции). В крупных и средних машинах употребляются открытые пазы (жесткие компаундированные секции, намотанные из меди прямоугольного сечения) рис. 209 и 210. Обмотка статора выполняется обычно с целым числом пазов на полюс и фазу $q_1$, так как при дробном $q_1$ появляются нежелательные гармонические в кривой поля возбуждения. При этом $q_1$ выбирается обычно больше 2, чтобы не получить чрезмерной величины рассеяния в воздушном зазоре и паразитных

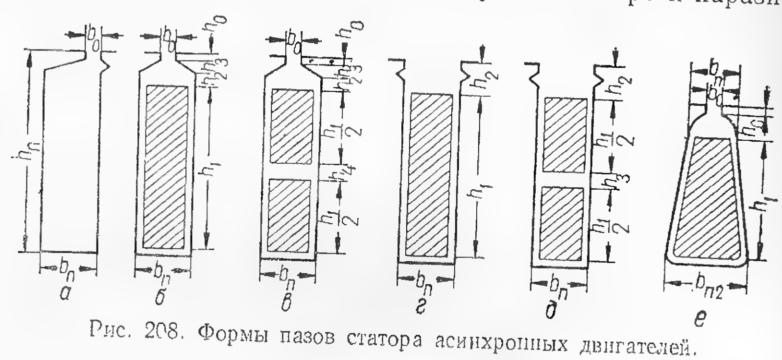



Рис. 208. Формы пазов статора асинхронных двигателей.

моментов. Во многих случаях, особенно при проектировании серий машин, приходится выбирать и дробные значения $q_1$. Выбор дробности дан в гл. 12.

Число пазов на полюс зависит от полюсного деления и напряжения машины. Обычно исходят из допустимой минимальной ширины зубца якоря и ширины паза. С точки зрения меньшей стоимости изоляции, хорошего коэффициента заполнения паза и меньшей стоимости штамповки желательно выбрать меньшее количество пазов, в особенности при высоких напряжениях, где толщина пазовой изоляции велика. Но принимая во внимание допустимую величину зубцовых гармонических (паразитные моменты, добавочные потери), а также условия теплоотвода, желательно, наоборот, выбрать большее число пазов. Наилучшее решение может быть найдено только расчетом ряда вариантов с различными числами пазов. Обычные пределы для шага паза 1 *см* $< t_1 <$ 5 *см* (исключая микромашины) (меньшие значения — для малых полюсных делений и низких напряжений, бо́льшие — для бо́льших полюсных делений и высоких напряжений). Более подробно метод выбора обмоток машин переменного тока изложен в § 12-11.

Таким образом, число пазов статора

$$Z_1 = \frac{\pi D}{t_1} \qquad (15)$$

или $Z_1 = 2pq_1m_1$ (целое четное число).



Типовая изоляция различных видов статорных обмоток и укладка проводников описаны в приложении V, а также в примерах расчетов асинхронных машин.

Шаг по пазам статора

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}. \qquad (16)$$

Подразделение шага

$$\lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0{,}4 - 0{,}5.$$

Число витков обмотки статора на фазу. Для определения числа витков следует сначала выбрать индукцию в зазоре (рис. 207) и поток на полюс. Выбор индукции в зазоре может быть сделан также по уравнению

$$B_\delta = B_z \zeta \varphi_{Fe}. \qquad (17)$$

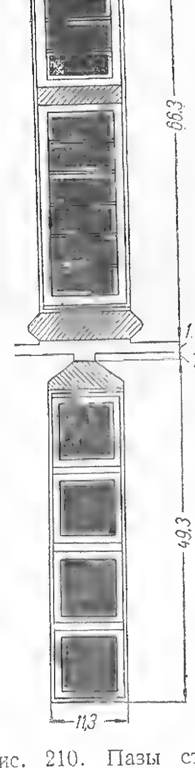



Рис. 210. Пазы статора и ротора асинхронного двигателя 900 *квт*, 3000 *в*, 1500 об/мин (ротор фазный).

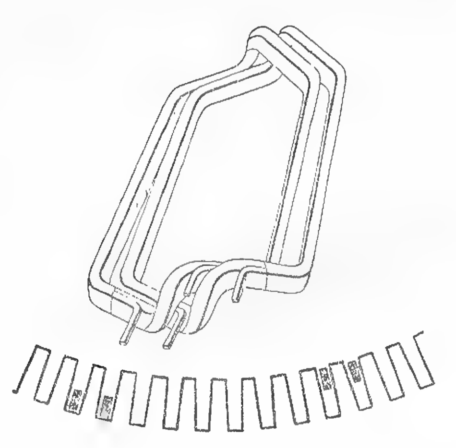


Рис. 209. Секция двухслойной обмотки с непрерывной изоляцией.

При этом индукцию в зубцах $B_z$ выбираем в пределах (1,2—1,8) · $10^{-4}$ *вб/см²* (для малых машин меньшее значение). Согласно гл. 2 $\zeta = \frac{b_z}{t_1} \approx 0{,}5$; $\varphi_{Fe} \approx 0{,}8—0{,}85$ для машин с радиальными каналами в статоре и $\varphi_{Fe} = k_п \approx 0{,}93$ для машин без каналов. Например, при $B_z = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*; $\zeta = 0{,}5$ и $\varphi_{Fe} = 0{,}85$ $B_\delta = 1{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}85 = 0{,}6 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*.

После выбора индукции $B_\delta$ находим магнитный поток на полюс

$$\Phi = \alpha_i \tau l_i B_\delta. \qquad (18)$$

При этом коэффициент расчетной полюсной дуги можно принять $\alpha_i \approx \frac{2}{\pi}$, или, более точно, по кривым рис. 17,б для заданного коэффициента насыщения $k_{\text{н}}$; первоначально можно задаться $k_{\text{н}} = 1{,}1—1{,}5$ с тем, чтобы проверить это значение после расчета намагничивающего тока.

Число витков в фазе

$$w_1 = \frac{E_{10}}{\pi \sqrt{2}\, f k_{w1} \Phi}. \qquad (19)$$

При этом окончательный выбор витков получится из условия:

$$w_1 = s_{\text{п}} p q_1 \ \text{(целое число)}, \qquad (20)$$

где $s_{\text{п}}$ — число последовательно соединенных проводников в пазу.

Число проводников в пазу $s_{\text{п}}$ при двухслойной обмотке должно быть целым и четным. В общем случае эти проводники состоят из ряда параллельных частичных проводников (см. ниже).

Число пазов $Z_1$ и число пазов на полюс и фазу должны удовлетворять условиям, рассмотренным выше.

При определении $w_1$ коэффициентом $k_{w1}$ можно задаться (например, $k_w = 0{,}95—0{,}93$) с тем, чтобы пересчитать его после окончательного выбора обмотки. Электродвижущую силу $E_{10}$ можно ориентировочно положить равной

$$E_{10} \approx \frac{U_1}{1 + \sigma_1} \approx (0{,}95—0{,}97)\, U_1, \qquad (21)$$

где $\sigma_1$ — первичный коэффициент рассеяния

$$\sigma_1 = \frac{x_1}{x_m}.$$

После окончательного выбора числа витков уточняем значение магнитного потока $\Phi$ и находим его «номинальное» значение

$$\Phi = \frac{E_{10}}{\pi \sqrt{2}\, f k_{w_1} w_1}; \quad \Phi_N = \Phi \frac{U_N}{E_{10}} \qquad (22)$$

и, соответственно, индукции в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i}; \quad B_{\delta_1} = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \tau l_i}; \quad B_{\delta N} = B_\delta \frac{U_N \alpha_i \pi}{2 E_{10}}; \quad B_{\delta N_1} = B_{\delta_1} \frac{U_N}{E_{10}}. \qquad (22a)$$

Ток и линейная нагрузка статора

$$I_1 = \frac{P_2}{m_1 U_1 \cos\varphi\, \eta}, \qquad (23)$$

где $P_2$, $\cos\varphi$ и $\eta$ — задаваемые значения полезной мощности, $\cos\varphi$ и к. п. д.

$$A = \frac{2 m_1 w_1 I_1}{\pi D}. \qquad (24)$$

Число параллельных ветвей. Иногда из условий, предъявляемых заказчиком, или из производственных условий выполне-



ния обмотки желательно иметь параллельные ветви обмотки. Число возможных параллельных ветвей

$$a = t,$$

где $t$ — общий наибольший делитель чисел $Z$ и $p$, но желательно иметь минимум параллельных ветвей, так как при увеличении числа параллельных ветвей число проводников в пазу растет и заполнение паза уменьшается. Обычно выбирают $a = 1, 2, 3, 4$ и редко выше. Для удобства намотки и уменьшения потерь на вихревые токи в крупных машинах катушка выполняется из ряда параллельных проводников, иногда переплетенных по способу, приведенному на рис. 37.

Общее сечение фазового провода (предварительный выбор)

$$q_{\text{ф}1} = \frac{I_1}{s_1}, \qquad (25)$$

где $s_1$ — плотность тока в статоре.

Плотность тока, согласно вышесказанному, выбирают на основании опыта построенных машин в пределах, данных в табл. 63. При прочих равных условиях, чем выше напряжение и мощность, тем ниже допустимая плотность тока. Оптимальная плотность тока для конкретных условий работы может быть установлена лишь в результате расчета ряда вариантов путем сравнения их показателей по нагреву и рабочим характеристикам.

Сечение проводника в одной параллельной ветви

$$q'_{\text{ф}1} = \frac{q_{\text{ф}1}}{a}. \qquad (26)$$

При больших токах $q'_{\text{ф}1}$ может состоять из $n_{\text{пр}}$ частичных проводников.

Сечение частичного проводника

$$q_{\text{Cu}} = bh, \qquad (27)$$

где $b$ — ширина меди, $h$ — высота меди (выбирают по стандарту, см. приложение III). С целью уменьшения добавочных потерь в меди от вихревых токов, особенно при большом числе частичных проводников в пазу, выбирают высоту отдельного проводника при 50 *гц* не больше 0,5 *см*. При числе проводников по высоте паза не больше 4 высота проводника может быть взята в случае необходимости до 1 *см*. После выбора меди размещают проводники в пазу, определяют окончательно размеры паза и вычерчивают эскиз паза в масштабе (см. пример расчета). Затем определяют сечение фазного провода и плотность тока по формулам:

$$q_{\text{ф}1} = a\, q_{\text{Cu}}\, n_{\text{пр}}; \quad s = \frac{I_1}{q_{\text{ф}1}}, \qquad (28)$$

где $n_{\text{пр}}$ — число параллельных частичных проводников.

Средняя длина полувитка и омическое сопротивление фазы статора. Средняя длина полувитка для корзиночной обмотки

$$\frac{1}{2} l_w \approx l + 1{,}8 \tau y. \qquad (29)$$

Для однослойных катушечных обмоток

$$\frac{1}{2} l_w \approx l + 2{,}4\tau y,$$

где $l$ — полная длина железа статора;

$y$ — шаг в долях единицы.

Более точно см. приложение VI.

Сопротивление фазы обмотки в омах и относительных единицах

$$r_1 = \rho_{75} \frac{l_w w_1}{q_{\phi 1}} \text{ ом}; \quad (30)$$

$$\boldsymbol{r_1} = \frac{r_1 I_{1N}}{U_{1N}} = \rho_{75} \frac{0{,}5 l_{w1} F_{1N}}{f \Phi_N k_w^2 S'_{Cu}}, \quad (30а)$$

где $S'_{Cu}$ — общее сечение меди на один полюс; $F_{1N}$ и $k_w$ — по § 4-5. Величина $\boldsymbol{r_1}$ должна соответствовать задаваемым относительным потерям в меди статора по § 11-3

$$\boldsymbol{r_1} \cos \varphi_N = \frac{p_{Cu1}}{P_N}.$$

Расчет реактивности рассеяния обмотки статора и ротора. Согласно гл. 4 реактивность рассеяния статора равна

$$x_1 = 4\pi\mu_0 f \frac{w_1^2}{pq} (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{\delta 1}) \text{ ом}. \quad (31)$$

Проводимости рассеяния пазов $\lambda_п$ для открытого, полузакрытого трапецоидального и круглого паза даны в гл. 4, формулы (11), (16). Для паза, имеющего форму, представленную на рис. 208, *б* и 208, *в* можно считать как для полузакрытого паза, т. е.

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_2}{b_п} + \frac{2h_3}{b_0 + b_п} + \frac{h_0}{b_0}. \quad (31а)$$

Для паза рис. 208, *г*

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b_{п1}} + \frac{h_0}{b_0} + 0{,}623. \quad (31б)$$

Для открытых и полузакрытых роторных пазов (рис. 211 и 219) без учета насыщения справедливы формулы (31а) и (31б).

Проводимости рассеяния лобовых частей $\lambda_л$ и дифференциального рассеяния рассчитываются по гл. 4 [формулы (22), (24) и формулы (69), (77), а также табл. 4 и кривые рис. 27 для целого и дробного $q$]. Расчеты проводимостей показаны также в примерах 1—6. Для проверки правильности определения $x_1$ желательно определить относительную реактивность рассеяния

$$\boldsymbol{x_1} = \frac{x_1 I_{1N}}{U_N},$$

которую можно также определить и непосредственно в виде

$$\boldsymbol{x_1} = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_{1N}}{\Phi_N^2 k_w^2} \lambda_1, \quad (32)$$



где

$$\lambda_1 = \frac{(\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{\delta 1}) 2p}{Z_1}; \quad F_{1N} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi p} I_{1N} w_1 k_w.$$

Относительная реактивность должна быть вблизи $\boldsymbol{x_1} \approx \frac{x_к}{2}$ по (12) и (13) или $\boldsymbol{x_1} \leqslant \frac{1}{4\boldsymbol{M}_{max}}$, где $\boldsymbol{M}_{max}$ — задаваемый максимальный момент в долях единичного момента $M'_N$.

Учет насыщения можно оценить опытными коэффициентами § 4-7.

Вес меди статора

$$G_{Cu1} = \gamma_{Cu} l_w w_1 q_{\phi 1} m_1 \text{ кг}, \quad (33)$$

(Сравнить вес меди на 1 *ква* с построенными машинами).

Внешний диаметр статора

$$D_{j1} = D + 2h_{п1} + 2h_{j1}, \quad (34)$$

где $h_{j1}$ — высота ярма статора. Для определения $h_{j1}$ задаются индукцией в ярме. Величина допустимых индукций в ярме $B_j$ лежит в пределах 1,1 — 1,4 *вб/м²*. Тогда

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 l_{Fe} B_{j1}}. \quad (35)$$

При расчете и последующем выборе внешнего диаметра статора желательно:

а) округлить $D_{j1}$ до целого числа или до значения, соответствующего нормалям МЭП (приложение I);

б) учесть возможность использования готовых штампов.

### 11-8. ОБМОТКА И ПАЗЫ РОТОРА

*Типы роторов.* Роторы асинхронных машин могут быть фазные (с кольцами) и короткозамкнутые. Машины с фазным ротором применяются в тех случаях, когда желательно получить плавный пуск без толчков тока или регулирование скорости путем введения реостата в цепь ротора. Кроме того, фазный ротор применяется в мощных машинах, а также в машинах, предназначенных для каскадного включения с индукционными, синхронными или коллекторными машинами. Во всех других случаях обычно применяют ротор короткозамкнутый.

*Фазные роторы.* Число пазов ротора $Z_2$ берут отличным от числа пазов статора. При этом $Z_2$ может быть как больше, так и меньше $Z_1$. Число пазов на полюс и фазу обычно выбирается равным $q_2 = q_1 \pm 1$, реже $q_2 = q_1 \pm 2$ (знак «+» для малых $q_1$). Для тихоходных машин иногда берут $q_2 = \frac{1}{2}$ или $q_2 = 1\frac{1}{2}$.

В крупных машинах и в машинах с короткозамкнутыми роторами всех типов желательно, но не обязательно выбирать $Z_2$ несколько меньше $Z_1$ (см. ниже).

Для малых машин роторные пазы выполняются иногда совершенно закрытыми (толщина перекрытия 0,3 — 0,5 *мм*) или полуоткрытыми. Обмотка для закрытых пазов — обычно однослойная и наматывается протягиванием проводов через пазы в осевом направлении. Полузакрытые пазы заполняются двухслойной насыпной обмоткой. Машины средней и большой мощности выполняются с двухслойной стержневой обмоткой на роторе с двумя стержнями на паз. Формы пазов для роторов с кольцами приведены на рис. 211. Данные о толщине изоляции по высоте и ширине в зависимости от напряжения приведены в приложении V. Типовые конструкции двигателей показаны на рис. 197 — 199.

Рис. 211. Формы пазов ротора асинхронных двигателей с фазным ротором.

Обмотка роторов с кольцами для крупных машин обычно бывает волновая с диаметральным шагом. Такая обмотка обеспечивает минимум междукатушечных соединений [62]. При возбуждении со стороны ротора обмотку ротора выполняют двухслойной с сокращенным шагом. Обмоточные коэффициенты, длину витка и параметры рассчитывают аналогично обмотке статора.

Необходимо заметить, что в крупных машинах с открытыми пазами на статоре и открытыми или чаще полузакрытыми в роторе, число пазов ротора желательно выбирать с учетом допустимых пульсационных потерь в зубцах.

Фазное напряжение роторов $U_2$ приведено в табл. 64.

*Таблица 64*

**Напряжения роторов в зависимости от мощности**

| Мощность (в *квт*) | До 100 | 100—200 | 200—500 | 500—2000 | 2000—10 000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Напряжение (в *в*) | 60—120 | 100—500 | 200—1000 | 500—1500 | 1000—2000 |

Линейное напряжение роторов по [141]

$$U_{2л} = 38\sqrt{P_{2N}}\,(1 \pm 0{,}17)\ в,$$

где $P_{2N}$ — в *квт*.

*Короткозамкнутые роторы.* Они разделяются на следующие типы: 1) обычный ротор с закрытыми или полузакрытыми пазами и с беличьей клеткой из круглых или прямоугольных стержней, замкнутых кольцами; 2) глубокопазный ротор с открытыми или полузакрытыми пазами; 3) двухклеточный ротор; 4) фигурнопазный ротор; 5) массивный ротор без обмотки или с обмоткой.



Обмотка короткозамкнутых роторов часто делается из алюминия заливкой его в пазы в расплавленном виде.

В ы б о р т и п а короткозамкнутого ротора диктуется следующими условиями.

Обычный ротор с нормальной клеткой для мелких машин обладает наилучшими свойствами, если не требуется получение относительно больших кратностей пускового момента и малых кратностей пускового тока. При возрастании мощности применение обычного короткозамкнутого ротора приводит к затруднениям при пуске (бо́льшие пусковые токи).

Уменьшение пусковых токов увеличением реактивности рассеяния приводит к уменьшению пусковых моментов и понижению $\cos\varphi$.

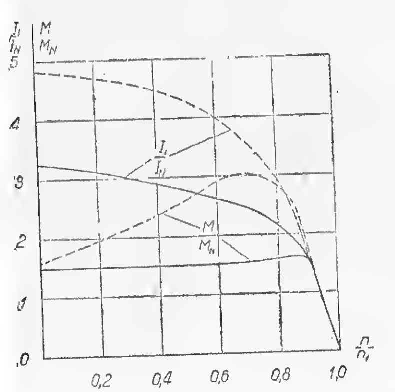


Рис. 212. Ток и вращающий момент асинхронных короткозамкнутых двигателей:
— — — — с ротором без вытеснения тока; ——— с глубокопазным ротором.

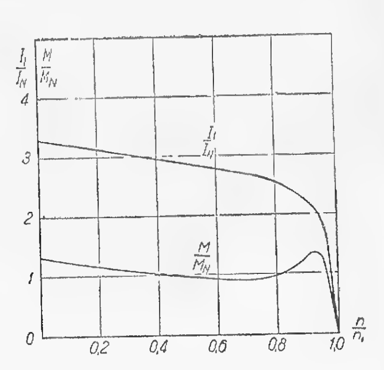


Рис. 213. Ток и вращающий момент для двигателей с двойной клеткой.

Увеличение сопротивления стержней с целью увеличения пускового момента приводит к ухудшению рабочих свойств.

Поэтому с возрастанием мощности машины целесообразно применять глубокопазные роторы. При этом обеспечиваются хорошие пусковые и рабочие свойства машины.

При дальнейшем увеличении мощности желательно применение ротора с двойной клеткой или с фигурным пазом.

Для сравнения пусковых свойств машин с различными роторами на рис. 212 и 213 приведены типовые характеристики (см. также примеры расчетов).

Массивный ротор без обмотки или с обмоткой употребляется в специальных машинах (быстроходные машины). Характеристики этих двигателей даны на рис. 232.

Ч и с л о п а з о в к о р о т к о з а м к н у т ы х р о т о р о в. При короткозамкнутых роторах необходимо обратить особое внимание на выбор числа их пазов. Число пазов ротора подбирают, исходя из допустимых паразитных (асинхронных и синхронных) моментов, из радиальных вибрационных сил и магнитного шума машины.

Из условий допустимой величины асинхронных паразитных моментов [6], [98]

$$Z_2 \leqslant 1{,}25\,(Z_1 + p). \tag{36}$$

В некоторых случаях, например, при конденсаторных двигателях необходимо, чтобы

$$\frac{Z_2}{2p} \neq \text{ц. ч.} \tag{37}$$

Из условий допустимых синхронных моментов желательно, чтобы

$$\left.\begin{aligned} Z_1 &\neq Z_2 \\ Z_1 &\neq Z_2 \pm 2p \\ Z_1 &\neq Z_2 kp \end{aligned}\right\}, \tag{38}$$

где $k$ — целое число.

Из условий выбрационных радиальных сил соотношение чисел пазов статора и ротора [53] должно удовлетворять неравенствам:

$$\left.\begin{aligned} Z_1 - Z_2 &\neq \pm 1, \\ Z_1 - Z_2 &\neq \pm 2p \pm 1 \end{aligned}\right\}, \tag{39}$$

т. е. желательно выбирать $Z_2$ четным, так как $Z_1$ всегда четно.

Кроме того, согласно [6], [53] следует избегать следующих равенств:

$$\left.\begin{aligned} &Z_2 - Z_1 = \pm 2p \pm 2, &\quad &Z_2 - Z_1 = \pm 6p \pm 1, \\ &Z_2 - Z_1 = \pm 2p \pm 3, & &Z_2 - Z_1 = \pm 6p \pm 2, \\ &Z_2 - Z_1 = \pm 2p \pm 4, & &Z_2 - Z_1 = \pm 6p \pm 3, \\ &Z_1 - Z_2 = 3p \pm 1 & &Z_2 - Z_1 = \pm 6p \pm 4. \\ &Z_1 - Z_2 = p \pm 1, & & \end{aligned}\right\} \tag{40}$$

Согласно [148] благоприятными числами пазов ротора являются

$$\left.\begin{aligned} Z_2 &= 6p\left(q_1 \pm \frac{2}{3}\right) \\ Z_2 &= 6p\,(q_1 \pm 1) \end{aligned}\right\} \tag{41}$$

(знак «+» для малых чисел $q_1$).

На основе многочисленных опытов и наблюдений [151] установлена единая формула выбора числа пазов ротора $Z_2$ при

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} = \text{ц. ч.}$$

$$Z_2 = (6q_1 \mp G)\,p + p.$$

В зависимости от величины $G$ получаются четыре области чисел $Z_2$: 1) область I, в которой получаются хорошие пусковые характеристики без скоса пазов и сокращения паза; 2) область II, в которой необходим скос паза; 3) область III, в которой необходим скос паза и сокращение шага; 4) области IV, V и VI — нерекомендуемые числа $Z_2$.

Для области I $G = 2, 3, 4 \mp 6g$ при условии, что: а) $G = q_1$; б) $G = 2q_1$ и в) $2q_1 \neq 6g$, где $g = 0, 1, 2, 3$ и т. д.

Значения $G = 2q_1$ дают минимальные и максимальные пределы для $Z_2$.

Для области II: $G = 2, 3, 4 \pm 6g$ при условии, что $G \neq q_1$,
» III: $G = 1 \pm 6g$ при условии, что $G < 2q_1$,
» IV: $G = 0 \mp 6g$ при условии, что $G \leqslant 2q_1$,
» V: $G = -1 \pm 6g$ при условии, что $G < 2q_1$,
» VI: $G = -1 \mp 6g$ при условии, что $G > 2q_1$.



Например, для $p = 2$ получится нижеследующая таблица рекомендуемых чисел пазов (табл. 65). Для других чисел $p$ соответствующие числа надо умножить на $p/2$.

Как видно, по [151] могут быть применены многие «запрещенные» по известным условиям числа пазов.

В табл. 66 приведена область рекомендуемых чисел пазов статора и ротора по заводским данным.

В отдельных случаях для уменьшения паразитных моментов прибегают к скошенным пазам на роторе. Влияние величины скоса

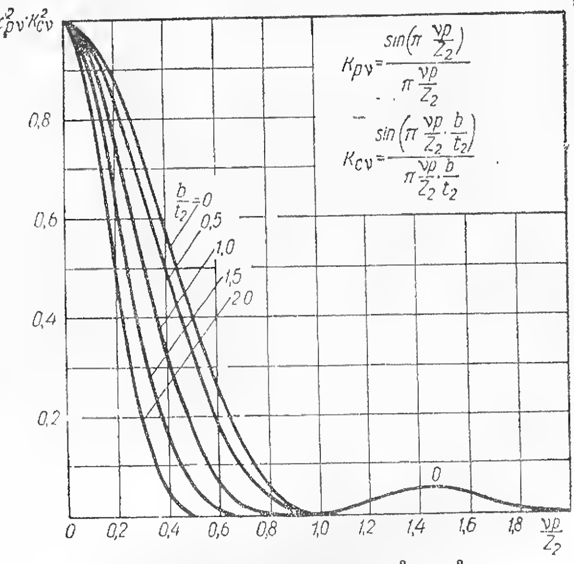



Рис. 214. Зависимость произведения $k^2_{p\nu} \cdot k^2_{c\nu}$ от отношения $\nu p/Z_2$ для различных скосов паза беличьей клетки.

и соотношения числа пазов статора и ротора на паразитные моменты можно видеть на рис. 214, на котором представлен квадрат обмоточного коэффициента $\nu$-й зубцовой гармонической статора $k^2_{p\nu}$, $k^2_{c\nu}$ по отношению к обмотке ротора. Коэффициент распределения обмотки ротора $k_{p\nu}$ и коэффициент скоса паза $k_{c\nu}$ по отношению к $\nu$-й гармонической статора по [53] и [98] равны

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\alpha}{2}}{\nu \frac{\alpha}{2}}; \tag{42}$$

$$k_{c\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\alpha}{2} \frac{b}{t_2}}{\nu \frac{\alpha}{2} \frac{b}{t_2}}, \tag{43}$$

где $\frac{b}{t_2} = \frac{\text{скос паза}}{\text{шаг паза}}$ — относительный скос паза ротора;

$\alpha = \frac{2\pi}{Z_2} p$ — угол в электрических градусах между соседними пазами.

Таблица 65

**Рекомендуемые числа пазов по [151] для $p=2$**

| $q_1$ | $Z_1$ | $Z_2$ |  |  |
|---|---|---|---|---|
|  |  | I | II | III |
| 2 | 24 | 18, 22, 30, 34 | 20, 32 | 28 |
| 3 | 36 | 32, 44 | 30, 34, 42, 46 | 28, 40 |
| 4 | 48 | 34, 42, 58, 66 | 44, 46, 54, 56 | 40, 52, 64 |
| 5 | 60 | 42, 82 | 44, 46, 54, 56, 58, 66 68, 70, 78, 80 | 52, 64, 76 |
| 6 | 72 |  | 54, 56, 58, 66, 68, 70, 78, 80, 82, 90, 92, 94 | 52, 64, 76, 88 |
| 7 | 84 | 58, 114 | 66, 68, 70, 78, 80, 82, 90, 92, 94, 102, 104, 106 | 64, 76, 88, 100, 112 |
| 8 | 96 | 66, 82, 114, 130 | 68, 70, 78, 80, 90, 92, 94, 102, 104, 106, 116 118, 126, 128 | 76, 88, 100, 112, 124 |

Примечание. Для других значений $p$ соответствующие числа пазов умножить на $p/2$.

Таблица 66

**Рекомендуемые числа пазов двигателей с короткозамкнутым ротором**

| Число полюсов $2p$ | Число пазов статора $Z_1$ | Число пазов ротора $Z_2$ |  |
|---|---|---|---|
|  |  | Прямые пазы | При скошенных пазах дополнительно |
| 2 | 18 |  | 26 |
|  | 24 | [16], 32 | (18), (30), 31, 33, 34, 35 |
|  | 30 | 22, 28 | (18), 20, 21, 23, (24), 37, 39, 40 |
|  | 36 | 26, 28, 44, 46 | 25, 27, 29, 43, 45, 47 |
|  | 42 | 32, 34, 50, 52 |  |
|  | 48 | 38, 40, 56, 58 | 37, 39, 41, 55, 57, 59 |
| 4 | 24 | [32] | 16, [20], 30, 33, 34, 35, 36 |
|  | 36 | 26, 44, 46 | (24), 27, 28, 30, [32], 45 |
|  | 42 | (34), (50), 52, 54 | (33), 34, [38], (51), 53 |
|  | 48 | 34, 38, 56, 58, 62, 64 | (36), 39, 40, [44], 57, 59 |
|  | 60 | 50, 52, 68, 70, 74 | 48, 49, 51, 56, 64, 69, 71 |
|  | 72 | 62, 64, 80, 82, 86 | 61, 63, 68, 76, 81, 83 |





| Число полюсов 2p | Число пазов статора $Z_1$ | Число пазов ротора $Z_2$ |  |
|---|---|---|---|
|  |  | Прямые пазы | При скошенных пазах дополнительно |
| 6 | 36<br>54<br>72<br>90 | 26, 46, [48]<br>44, 64, 66, 68<br>56, 58, 62, 82, 84, 86, 88<br>74, 76, 78, 80, 100, 102, 104 | 47, 49, 50<br>42, 43, 65, 67<br>57, 59, 60, 61, 83, 85, 87<br>75, 77, 79, 101, 103, 105 |
| 8 | 48<br>72<br>84<br>96 | 34, 62, [64]<br>58, 86, 88, 90<br>66, (68), 70, 98, 100, 102, 104<br>78, 82, 110, 112, 114 | 35, 61, 63, 65<br>56, 57, 59, 85, 87, 89<br>(68), (69), (71), (97), (99), (101)<br>79, 80, 81, 83, 109, 111, 113 |
| 10 | 60<br>90<br>120 | 44, 46, 74, 76<br>68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112<br>86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106<br>134, 136, 138, 140, 142, 144, 146 | 57, 63, 77, 78, 79<br>70, 71, 73, 87, 93, 107, 109<br>99, 101, 103, 117, 123, 137, 139 |
| 12 | 72<br>90<br>108 | 56, 64, 80, 88<br>68, 70, 74, 82, 98, 106, 110<br>86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132 | 69, 75, 80, 89, 91, 92<br>(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)<br>84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127 |
|  | 144 | 124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172 | 125, 127, 141, 147, 161, 163 |
| 14 | 84<br>126 | 74, 94, 102, 104, 105<br>106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158 | 75, 77, 79, 89, 91, 93, 103<br>107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145 |
| 16 | 96 | 84, 86, 106, 108, 116, 118, 120 | 90, 102 |
|  | 144 | 122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172 | 138, 150 |

Примечание. Числа пазов в круглых скобках дают ухудшенные пусковые характеристики, числа пазов в квадратных скобках не должны применяться для двигателей, работающих в режиме реверса.

Отношение максимального момента от прямо вращающейся волны ν-го порядка к пусковому моменту основной волны по [84] равно

$$\frac{M'_{\nu\max}}{M_{1\,пуск}} \approx \frac{1}{2\nu^3} k^2_{p\nu} k_{c\nu} \left(\frac{k_{w\nu}}{k_{w1}}\right)^2 \left(\frac{I_k}{I_0}\right)^2 \frac{z_к}{r'_2} \frac{z_к}{x'_s}. \qquad (44)$$

Например, для $\nu = 7$, $p = 2$, $Z_2 = 40$ при отсутствии скоса

$$k_{c\nu} = 1; \; k_{p\nu}^2 \cdot k_{c\nu}^2 = \left(\frac{\sin \nu p\pi/Z_2}{\nu p\pi/Z_2}\right)^2 = \left(\frac{\sin 0{,}315\,\pi}{0{,}315\pi}\right)^2 = 0{,}65$$

и при отсутствии сокращения шага

$$\left(\frac{k_{w\nu}}{k_{w_1}}\right)^2 \approx \left(\frac{1}{\nu}\right)^2 = \left(\frac{1}{7}\right)^2.$$

При

$$\left(\frac{I_к}{I_0}\right)^2 = \left(\frac{5}{0{,}25}\right)^2 = 400; \quad \frac{z_к}{r_s'} = 10; \quad \frac{z_к}{x_{2s}'} = 2$$

получим

$$\frac{M'_{7\,\max}}{M_{1\,пуск}} = \frac{1}{2 \cdot 7^3} \cdot 0{,}65\,\frac{1}{49} \cdot 400 \cdot 10 \cdot 2 \approx \frac{1}{7}.$$

При соответствующем выборе $Z_2$ и скосе пазов величину $k_{p\nu}^2 k_{c\nu}^2$ можно сделать весьма малой. Как показывают кривые рис. 214 уже при $\frac{\nu p}{Z_2} \geqslant 0{,}4$ значение произведения $k_{p\nu}^2 k_{c\nu}^2$ не превышает 0,05 при наличии скоса пазов. При отсутствии скоса эта величина $k_{p\nu}^2 k_{c\nu}^2$ получается при $\frac{\nu p}{Z_2} > 0{,}8$.

## 11-9. РАСЧЕТ ФАЗНОГО РОТОРА

1. На основании сказанного в § 11-8 выбираем число пазов ротора:

$$Z_2 = 2pq_2m_2, \tag{45}$$

причем

$$m_2 = m_1.$$

Пазовое деление ротора

$$t_2 = t_{21} = \frac{\pi(D - 2\delta)}{Z_2}. \tag{46}$$

Диаметр ротора

$$D_r = D - 2\delta. \tag{47}$$

2. Фазный ток ротора при номинальной нагрузке (приближенно)

$$I_{2N} = \frac{P_{2N} + p_m + p_п + p_0}{m_2 E_{2о}(1 - s_N)\cos\varphi_2} \approx \frac{P_{2N}(1 + 0{,}015)}{m_2 E_{2о}(1 - s_N)}. \tag{48}$$

Здесь сумма потерь механических $p_m$ пульсационных $p_п$ и поверхностных $p_0$ на холостом ходу ориентировочно принята 0,015 от $P_{2N}$.

3. Электродвижущая сила на фазу ротора

$$E_{2о} = E_{1о}\frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_{w1}} \approx U_2; \tag{49}$$

максимальное напряжение на кольцах $U_2$ выбирается по табл. 64. Коэффициент обмотки $k_{w2}$ определяется аналогично $k_{w1}$. Обмотка ротора выбирается обычно диаметральной, поэтому $k_{y2} = 1$. Из уравнения (49) определяем число витков $w_2$.



Число проводников в пазу ротора, соединенных последовательно,

$$s_{п2} = \frac{2m_2w_2}{Z_2} = \frac{2m_1w_1}{Z_2}\,\frac{U_2}{U_1} \tag{50}$$

(при двухслойной обмотке $s_{п2}$ — целое четное число; $m_2 = m_1$).

4. Число витков ротора на фазу

$$w_2 = \frac{Z_2 s_{п2}}{2m_2}. \tag{51}$$

5. Сечение фазного провода ротора

$$q_{ф2} = \frac{I_{2N}}{s_2}. \tag{52}$$

Плотность тока в роторе $s_2$ выбирают несколько (на 25—30%) выше, чем плотность тока в статоре, в особенности при относительно высоких напряжениях статора (3—6—10 *кв*). Выбор сечения необходимо также проверить по величине задаваемого номинального скольжения ($s_N$) или относительных потерь в меди ротора

$$s_N = \frac{I_{2N} r_2}{E_{2о}}; \; r_2 = \rho_{75}\frac{l_{w2} w_2}{q_{ф2}}, \tag{53}$$

где $l_{w2} \approx 2(l + 1{,}4\tau)$.

6. Определим точную ширину паза $b_{п2}$ и глубину $h_{п2}$ после размещения проводников. Как и для статора, выбираем провод по стандарту с таким расчетом, чтобы глубина паза, равная суммарной высоте проводов плюс изоляция и клин, получилась порядка $(0{,}08—0{,}1)\,\tau$, а ширина паза $b_п \approx 0{,}5\,t_2$.

$$q_{ф2} = bha_2n_{пр}. \tag{54}$$

После выбора меди и типа изоляции ротора размещают обмотку, определяют точные размеры паза и вычерчивают эскиз паза в масштабе (см. примеры расчета).

7. Проверка максимальной индукции в зубцах ротора:

$$B_{z23} = B_\delta \frac{l_i t_{21}}{l_{Fe} b_{23}}, \tag{55}$$

где $b_{23} = b_{2\,\min}$ — минимальная ширина зубца.

Максимальная индукция обычно не должна превосходить 2 *вб/м²* (20 000 *гс*).

8. Длина полувитка ротора рассчитывается по (29) или по приложению VI. При этом в указанной формуле вместо коэффициента 1,8 необходимо взять 1,3—1,4.

Сопротивление фазы ротора при 75°C

$$r_2 = \rho_{75}\frac{l_{w_2} w_2}{q_{ф_2}}; \; r_2' = r_2\left(\frac{w_1 k_{w_1}}{w_2 k_{w_2}}\right)^2; \tag{56}$$

$$r_2 = \frac{r_2' I_{1N}}{U_N} = \rho_{Cu}\frac{\frac{1}{2} l_{w_2} F_{1N}}{f\Phi_N k_{w_2}^2 S_{Cu_2}}, \tag{57}$$

где $S_{Cu_2}$ — общее сечение меди ротора на полюсное деление.

Реактивность рассеяния ротора — по формуле (31) при подстановке вместо $w_1$, $q_1$ $\lambda_{п1}$, $\lambda_{л1}$, $\lambda_{\delta 1}$ соответствующих величин для ротора $w_2$, $q_2$, $\lambda_{п2}$, $\lambda_{л2}$, $\lambda_{\delta 2}$. Проводимости паза $\lambda_п$, лобовых частей $\lambda_л$ и дифференциальной $\lambda_\delta$ по гл. 4 и по примерам расчета.

Относительная реактивность рассеяния ротора

$$\boldsymbol{x}_2 = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_{1N}}{\Phi_N k_{w2}^2}\lambda_2, \qquad (58)$$

где

$$\lambda_2 = \frac{(\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2})\, 2p}{Z_2}.$$

Должно быть

$$\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{x}_2 = \boldsymbol{x}_к \approx \frac{1}{2\boldsymbol{M}_{\max}\cos\varphi_N}; \quad \boldsymbol{M}_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_N}.$$

Вес меди обмотки ротора

$$G_{Cu2} = \gamma_{Cu} l_{w2} w_2 m_2 q_{ф2}; \ \gamma_{Cu} = 8{,}9 \cdot 10^{-3} \ кг/см^3.$$

9. Высота ярма определяется по допустимой индукции в ярме ротора $B_{j2}$, которая лежит в пределах 1 — 1,5 *вб/м²*,

$$h_{j2} = \frac{\Phi}{2l_{Fe}B_{j2}}.$$

10. Внутренний диаметр ротора

$$D_{j2} = D - 2\delta - 2h_{п2} - 2h_{j2}. \qquad (59)$$

П р и м е ч а н и е. Если диаметр машины малый, то железо ротора может быть запрессовано непосредственно на вал. В этом случае высота ярма ($h_{j2}$) может быть несколько больше, чем полученная выше.

### 11-10. РАСЧЕТ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА

Расчет намагничивающего тока производится по методу, рассмотренному в гл. 3. Магнитная цепь представлена на рис. 215, *а*, *б*. Так как насыщение в асинхронных машинах берут небольшое, то м. д. с. на зубцы достаточно рассчитать по сечению $x$ зубца на $\frac{1}{3}$ высоты, т. е. $b_{zx} = b_{z^1/_3}$ (см. пример расчета).

Расчет м. д. с. на воздушный зазор производится с учетом уплощения кривой (рис. 17): удельная м. д. с. на зубцы определяется по приложению II с заранее учтенным уплощением (примеры расчета 1 и 2);

удельная м. д. с. на ярмо — по приложению II с у ч е т о м н е р а в н о м е р н о с т и и н д у к ц и и в я р м е.

Приближенно

$$\boldsymbol{I}_0 = \frac{k_н}{\boldsymbol{x}_m},$$

где

$$\boldsymbol{x}_m = \frac{\mu_0 \sqrt{2} k_{w1} \tau}{\pi\delta'} \frac{A_N}{B_{\delta 1N}} \ \text{или} \ \boldsymbol{x}_m = \frac{F_{1N}}{F_{\delta N}};$$

$k_н = 1{,}1 — 1{,}5$ — коэффициент насыщения; $F_{\delta N} = \frac{B_{\delta 1N}\delta'}{\mu_0}$.



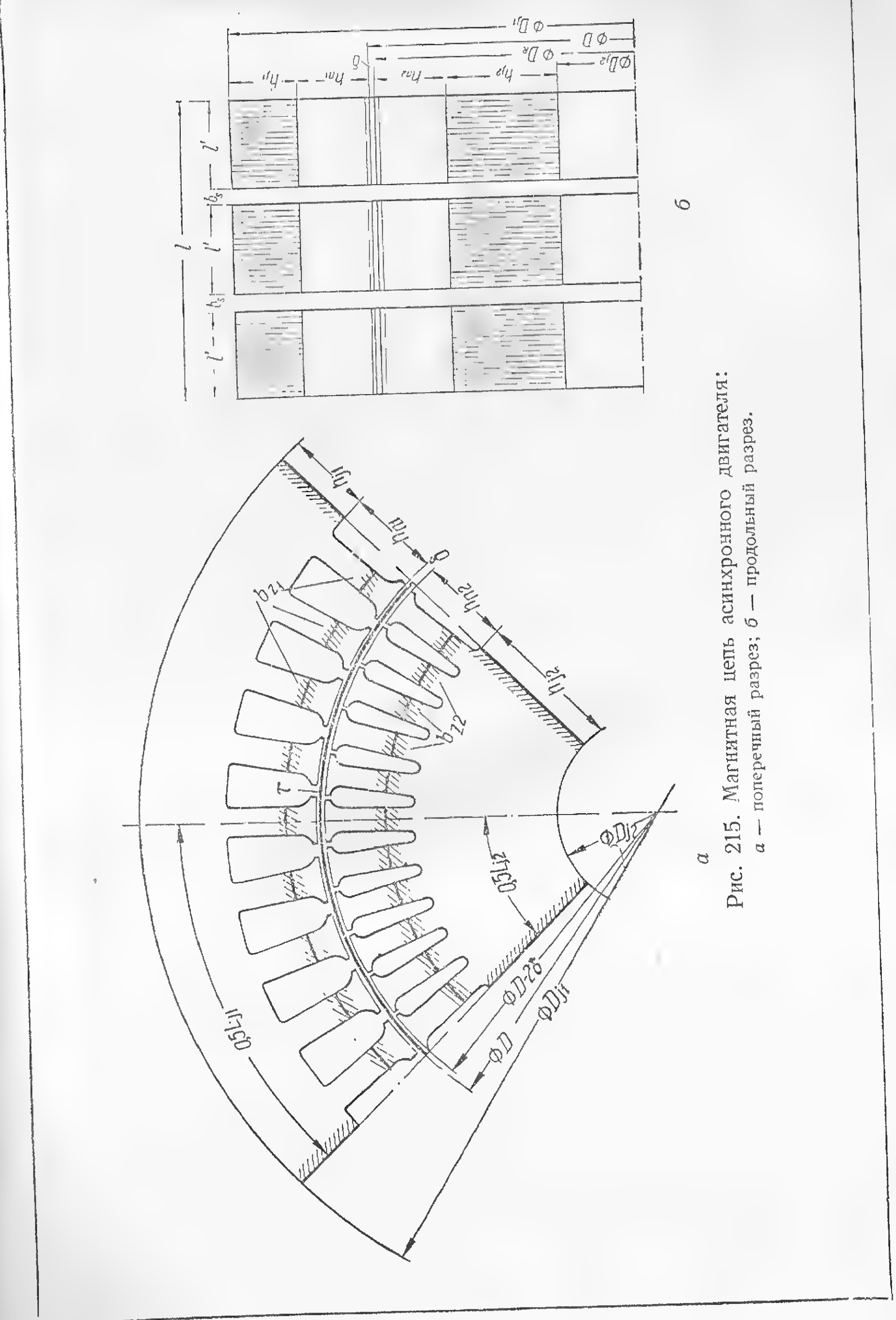


Рис. 215. Магнитная цепь асинхронного двигателя:
*а* — поперечный разрез; *б* — продольный разрез.

## 11-11. ПРОВЕРКА ЗАДАННЫХ ВЕЛИЧИН (АНАЛИТИЧЕСКИ ИЛИ ПО КРУГОВОЙ ДИАГРАММЕ)

1. Проверка кратности тока короткого замыкания

$$I_к \approx \frac{U}{\sqrt{\left(x_1 + \frac{x_2'}{c_2}\right)^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{c_2}\right)^2}}. \qquad (60)$$

2. Проверка кратности максимального момента без учета активного сопротивления статора*

$$M_{\max} \approx \frac{mU}{2(x_1 + x_2' c_1) c_1} = \frac{mU^2}{2x_к''} \text{ синхронных } вт, \qquad (61)$$

где

$$x_к'' = x_1 c_1 + x_2' c_1^2.$$

При учете активного сопротивления статора

$$M_{\max} = \frac{m_1 U^2}{2[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2 c_1)^2}] c_1}, \qquad (62)$$

где

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m}; \; c_2 = 1 + \frac{x_2'}{x_m}.$$

Максимальная активная мощность (*вт*)

$$P_{a\max} = \frac{M_{\max}}{1 + \cos\varphi_к},$$

где

$$\cos\varphi_к = \frac{r_к}{z_к} = \frac{M_п}{I_п}$$

[В (62) знак «плюс»—для двигателя, знак «минус»—для генератора].

3. Аналитическая проверка коэффициента мощности:

а) при заданной активной мощности $P_{2N}$ и к. п. д. активная составляющая тока

$$I_{a1} = \frac{P_{2N}}{3U_1\eta}. \qquad (63)$$

Зная величины

$$I_{2к}'' = \frac{U_1}{x_к''}$$

и $I_0$, найдем [53]

$$\cos\varphi_{1N} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_0}{I_{a1}} + \frac{I_{a1}}{I_{2к}''}\right)^2}}; \qquad (64)$$

* В дальнейшем все моменты выражены в синхронных ваттах или в долях единицы. Для получения момента в килограммометрах (61) следует разделить на $9{,}81 \frac{2\pi f}{p}$.



б) при заданном номинальном токе ($I_{1N} = 1$)

$$\cos\varphi_{1N} \approx \sqrt{1 - (I_0 + x_2)^2}, \qquad (65)$$

где $I_0$ и $x_2$ в долях единицы.

В случае несоответствия заданию необходимо изменить соответствующие размеры машины и произвести перерасчет. Так, например, если максимальный момент мал, необходимо уменьшить $x_к'' = x'c_1 + x_2' c_1^2$ уменьшением проводимостей рассеяния или уменьшением линейной нагрузки, т. е. увеличением размеров машины.

## 11-12. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И К. П. Д.

Расчет потерь производится по гл. 5 (см. примеры расчетов 1 и 2). Приводим здесь некоторые дополнительные формулы для определения механических потерь и потерь в железе.

Механические потери (при подшипниках скольжения) могут быть определены по [150] в процентах от полезной мощности:

$$p_m = (0{,}7 \div 0{,}9) \sqrt[3]{\frac{n}{1000}} \sqrt[4]{\frac{1000}{P_2}} \%, \qquad (66)$$

где $n$ — скорость вращения, об/мин;

$P_2$ — полезная мощность, *квт*.

При $n = 3000$ об/мин механические потери больше потерь, определяемых формулой (66) на 30—60%.

По [148]

$$p_m = \frac{8D}{100} \frac{l + 15}{100} v_a \; вт, \qquad (67)$$

где $D$ и $l$ — диаметр расточки и активная длина, *см*;

$v_a$ — окружная скорость, *м/сек*.

Потери в железе при холостом ходе (вместе с добавочными потерями) по [102], если индукция в *вб/м²*,

$$p_{Fe} = c_{Fe} \, p_{10} (G_{j1} B_{j1}^2 + G_{z1} B_{z1}^2) 10^{-3} \; квт, \qquad (68)$$

где $c_{Fe} = 2$ — при полуоткрытом пазе статора (паз ротора полузакрытый); $c_{Fe} = 2{,}6 \div 2{,}9$ — при открытом пазе статора для двигателей с контактными кольцами; $c_{Fe} = 2{,}7 \div 3{,}0$ — при открытом пазе статора для двигателей с короткозамкнутым ротором.

## 11-13. ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

Точный расчет температуры производится по методу, изложенному в гл. 6. Для открытых защищенных конструкций, а также для машин с замкнутой системой вентиляции при наличии радиальных или аксиальных каналов в статоре и роторе можно пользоваться приближенным методом. Согласно этому методу (гл. 6) среднее превышение температуры меди обмотки

$$\theta_{Cu\,ср} = \theta_{Fe} + \theta_i + \theta_a, \qquad (69)$$

где

$$\theta_{Fe} = \frac{p_{Cu} + p_{Fe}}{\Lambda_2 + \Lambda_a}; \quad \theta_i = \frac{p_{Cu}}{\Lambda_{12}} \frac{l_{Fe}}{0{,}5 l_w}; \quad \theta_a = \frac{0{,}5 \Sigma p}{1{,}1 V_a};$$

$\Lambda_2 = \alpha_{Fe} \pi D l$; $\Lambda_a$ по (52, 65) гл. 6;

$$\Lambda_{12} = \frac{\Pi Z_1 l_{Fe}}{\Delta_i} k_i. \qquad (70)$$

Здесь $\Pi = 2(h_п + b_п)$ — периметр паза;
$l_w$ и $V_a$ — длина витка и расход воздуха, $м^3/сек$;
$\Delta_i$ и $k_i$ — толщина и теплопроводность изоляции паза;
$p_{Cu}$, $p_{Fe}$ — потери в меди и потери в железе;
$\alpha_{Fe}$ — удельная теплоотдача от железа якоря

$$\alpha_{Fe} \approx \alpha_0 \frac{l_{Fe}}{l} \left[ (1 + \sqrt{v_\delta}) \frac{b_z}{t_1} + (1 + \sqrt{v_j}) \frac{D_j}{D} \right] + \alpha_s k_{ss} (1 + \sqrt{v_s}), \qquad (71)$$

где

$$\alpha_s \approx 14 \cdot 10^{-4} \ \frac{вт}{см^2 °C}; \ \alpha_0 \approx 28 \cdot 10^{-4} \frac{вт}{см^2 °C};$$

обычно $\alpha_{Fe} \approx (7 \div 9) \tau \cdot 10^{-4} \frac{вт}{см^2 °C}$.

Скорости воздуха в зазоре $v_\delta$, у спинки $v_j$ и в каналах $v_s$ зависят от интенсивности вентиляции: а) в открытых и в защищенных конструкциях с радиальными каналами в статоре и в роторе, а также с замкнутой системой вентиляции приближенно можно принимать:

$$v_\delta \approx 0{,}5 v_a; \ v_j \approx v_s \approx 0{,}25 v_a \ \frac{м}{сек.},$$

где $v_a$ — окружная скорость ротора, $м/сек$;

б) при точных расчетах скорости воздуха следует брать из вентиляционного расчета. До производства вентиляционного расчета задаются скоростями воздуха на основании данных опыта.

Для радиальной вентиляции отношение поверхности каналов к $\pi D l$

$$k_{ss} \approx \frac{(0{,}6 \div 0{,}7) \tau}{l'}, \qquad (72)$$

где $l'$ — ширина одного пакета.

Для аксиальной вентиляции формула (71) справедлива при $\alpha_s = 16 \cdot 10^{-4} \frac{вт}{см^2 °C}$;

$$k_{ss} = \frac{\text{периметр всех аксиальных каналов}}{\text{диаметр расточки}} = \frac{n_к d_к}{D}. \qquad (73)$$

При отсутствии радиальных каналов в формуле (72) для $k_{ss}$ вместо $l'$ надо подставить длину железа якоря $l_{Fe}$, при отсутствии аксиальных каналов $k_{ss} = 0$.

Особенности и методика теплового расчета **закрытых машин** при воздушном и водяном охлаждении изложены в гл. 6. Вентиляционные расчеты производятся по гл. 7.

Механический расчет и расчет подшипников производится по гл. 8.



## 11-14. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ, СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ, КРУГОВАЯ ДИАГРАММА И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Уравнения равновесия э. д. с. в статоре и роторе

$$\left. \begin{aligned} \dot U_1 &= \dot I_1 (r_1 + jx_1) + j(\dot I_1 + \dot I_2') \dot z_m \\ \dot U_2' &= \dot I_2' (r_2' + jx_2') + j(\dot I_1 + \dot I_2') \dot z_m \end{aligned} \right\}; \qquad (74)$$

$$r_1 + jx_1 = \dot z_1; \ \dot I_1 + \dot I_2' = \dot I_\mu;$$

$$\frac{r_2'}{s} + jx_2' = \dot z_2'(s); \ \dot z_m = r_m + jx_m.$$

Пренебрегая потерями в железе (в дальнейшем $\dot z = z$)

$$z_m \approx jx_m;$$

при отсутствии дополнительных машин в цепи ротора $U_2' = 0$. Решение системы относительно $\dot I_1$ и $\dot I_2'$ дает:

$$\dot I_1 = \dot I_{10} + \dot I_2'' = \frac{\dot U_1}{z_m + z_1} + \frac{\dot U_1}{c_1 z_1 + c_1^2 z_2'(s)} = \frac{\dot U_1}{z_m + z_1} + \frac{\dot U_1}{z_1' + z_2''(s)}; \qquad (75)$$

$$\dot I_2' = \frac{\dot U_1}{z_1 + c_1 z_2'(s)} = \dot I_2'' c_1, \qquad (76)$$

где

$$c_1 = 1 + \frac{z_1}{z_m} \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}; \ z_1' = z_1 c_1 \text{ и } z_2''(s) = c_1^2 z_2'(s).$$

Уравнению (75) соответствует схема замещения рис. 216,*а*. Для случая независимости параметров от тока и скольжения получаем круговую диаграмму, приведенную на рис. 216, *б*.

Для построения круговой диаграммы или аналитического расчета характеристик определяем параметры

$$x_m = \frac{E_{10} \sin \varphi_m}{I_{10}} \ ом; \quad r_m = \frac{p_{Fe}}{m I_{10}^2} \ ом \qquad (77)$$

или

$$r_m = \frac{p_{Fe}}{P_N} \left( \frac{I_N}{I_0} \right)^2; \ z_2'(s) = \frac{r_2'}{s} + jx_2'. \qquad (78)$$

Ток «идеального холостого хода»

$$\dot I_{10} = \dot I_{10а} - jI_{10р}; \ I_{10} = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_m)^2 + x_m^2}}; \qquad (79)$$

$$I_{10а} = I_{10} \cos \varphi_0; \ I_{10р} = I_{10} \sin \varphi_0.$$

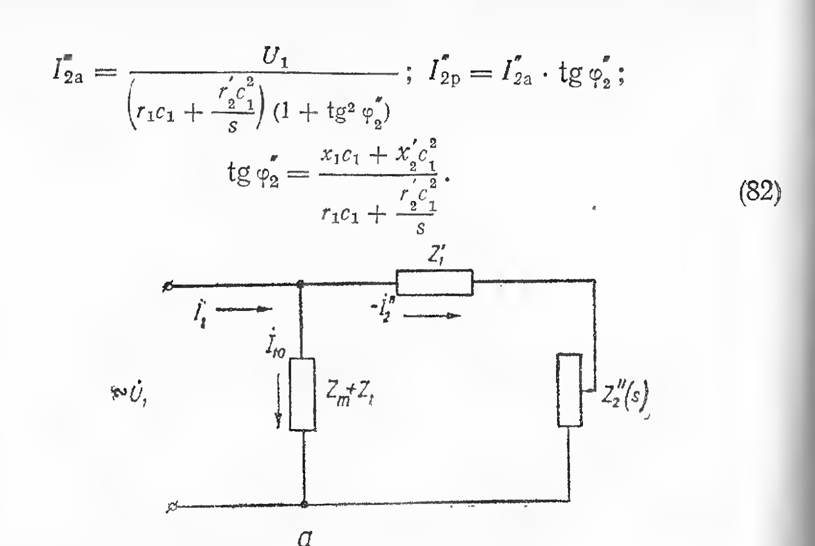
Расчетный вторичный ток

$$\dot I_2'' = \dot I_{2а}'' - j\dot I_{2р}''; \qquad (80)$$

$$I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{\left( r_1 c_1 + \frac{r_2' c_1^2}{s} \right)^2 + (x_1 c_1 + x_2' c_1^2)^2}} = \frac{U_1}{z(s)}; \qquad (81)$$

$$I''_{2a}=\frac{U_1}{\left(r_1c_1+\frac{r'_2c_1^2}{s}\right)(1+\operatorname{tg}^2\varphi''_2)};\quad I''_{2p}=I''_{2a}\cdot\operatorname{tg}\varphi''_2;$$

$$\operatorname{tg}\varphi''_2=\frac{x_1c_1+x'_2c_1^2}{r_1c_1+\frac{r'_2c_1^2}{s}}. \tag{82}$$



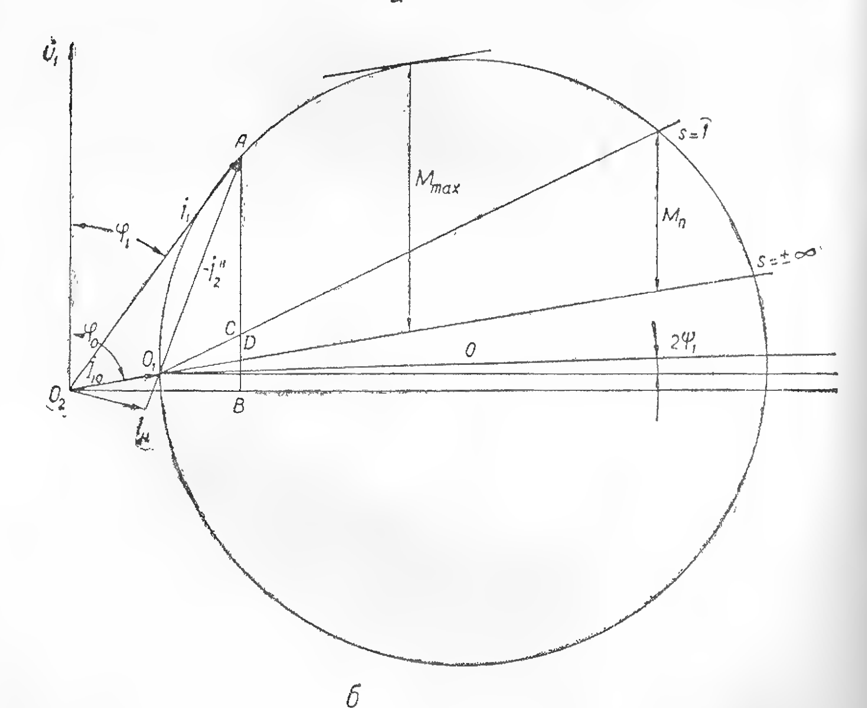




Рис. 216. Схема замещения *(а)* и круговая диаграмма *(б)* асинхронной машины.

Первичный ток и $\cos\varphi_1$

$$I_1=\sqrt{(I''_{2a}+I_{10a})^2+(I''_{2p}+I_{10p})^2}; \tag{83}$$

$$\cos\varphi_1=\frac{I''_{2a}+I_{10a}}{I_1}.$$



Действительный вторичный ток по (76)

$$I'_2=I''_2c_1.$$

В нормальных машинах $c_1\approx 1+\sigma_1$; $\sigma_1=\frac{x_1}{x_m}$.

Принимая во внимание тот факт, что реактивные сопротивления вследствие насыщения железа в действительности меньше, можно для упрощения расчетов положить $c_1\approx 1+\sigma_1\approx 1$ в тех случаях, когда не делается особого учета насыщения и когда $\sigma_1$ не превосходит 0,05.

Диаметр круга вторичного тока $I''_2$

$$D_2=\frac{U_1}{x_1c_1+x'_2c_1^2}=\frac{U_1}{x''_к}. \tag{84}$$

Угол поворота круга вторичного тока $2\psi_1\approx 0$.

Обычно рекомендуемый [53], [95] поворот на угол $2\psi_1=\operatorname{arc\,tg}\frac{2r_1}{x_1+x_m}$ не всегда является оправданным и в отдельных случаях может привести к погрешностям.

При более точных подсчетах, необходимость в которых может возникнуть при включении в первичную цепь индуктивностей или при анализе работы асинхронных генераторов, тангенс угла поворота $2\psi_1$ согласно [89] равен

$$\operatorname{tg}2\psi_1=\frac{2(x_mr_1-x_1r_m)}{x_m(x_m+x_1)+r_m(r_m+r_1)}\approx\frac{2r_1}{x_m+x_1}-\frac{2\operatorname{tg}\rho}{c_1}\cdot\frac{x_1}{x_m}, \tag{85}$$

где $\operatorname{tg}\rho$ — тангенс угла потерь в цепи намагничивания

$$\operatorname{tg}\rho=\frac{r_m}{x_m}. \tag{86}$$

Как видно из (85), в случае подключения к реактивности статора значительной внешней реактивности (пуск через реактор, работа асинхронного генератора через трансформатор и т. п.), поворот круга вторичного тока может получиться даже в обратную сторону.

1. Подводимая мощность по диаграмме (рис. 216)

$$P_1=m_1U_1\overline{AB}=mU_1I_1\cos\varphi_1, \tag{87}$$

где отрезок $\overline{AB}$ — в масштабе тока.

2. Мощность на валу

$$P'_2=m_1I'^2_2r'_2\frac{1-s}{s}=m_1U_1\overline{AC}. \tag{88}$$

3. Момент $M$ (или электромагнитная мощность $P_{12}$):

$$M=\frac{P_{12}}{2\pi n_1}\ дж\ \text{или}\ M=\frac{P_{12}}{2\pi n_1\cdot 9{,}81}\ кгм, \tag{89}$$

где $n_1=\frac{f_1}{p}$ об/сек;

$$P_{12}=m_1I'^2_2\frac{r_2}{s}=m_1U_1\cdot\overline{AD}. \tag{90}$$

4. Скольжение из диаграммы

$$s = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{P_{12}}. \tag{91}$$

5. Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{m_1 U_1 I_1}. \tag{92}$$

Типовые характеристики асинхронной машины представлены на рис. 217.

Анализ экономической эффективности проектных вариантов может быть произведен в соответствии с § 12-23.

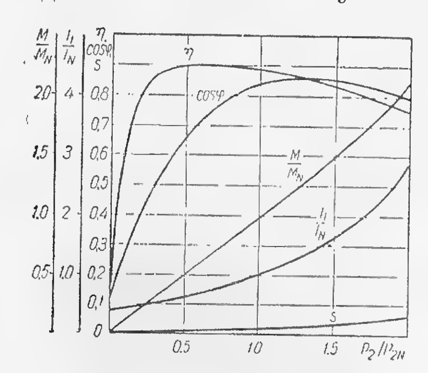


Рис. 217. Рабочие характеристики асинхронных двигателей средней мощности.

## 11-15. КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ РОТОР С НОРМАЛЬНОЙ КЛЕТКОЙ И С КРУГЛЫМ ИЛИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ПАЗОМ

Выбор числа пазов ротора производится в соответствии с вышеизложенным.

Число фаз короткозамкнутого ротора принимают $m_2 = Z_2$ или $m_2 = \frac{Z_2}{p}$. Примем $m_2 = Z_2$, т. е. каждый стержень представляет собой фазный провод.

Электродвижущая сила на фазу (стержень) в соответствии с формулой (49) равна

$$E_{20} = E_{10}\frac{w_2 k_{w_2}}{w_1 k_{w_1}} \text{ или } E_{20} = \frac{B_{\delta N} v_a}{\sqrt{2}}, \tag{93}$$

где

$$w_2 = \frac{1}{2};\ k_{w_2} = 1;\ B_{\delta N} \text{ по } (22,\ a).$$

Ток в стержне определяется по (48).

Подставляя в (48) вместо $m_2$ величину $Z_2$, найдем ток в стержне

$$I_c \approx \frac{P_{2N}(1 + 0{,}015)^*}{Z_2 E_{20}(1 - s_N)}. \tag{94}$$

* Здесь ток $I_c$ определяем ориентировочно, см. (48).



Ток в кольце * равен (рис. 218)

$$I_л = \frac{I_c}{2\sin p\frac{\pi}{Z_2}} \approx I_c\frac{Z_2}{2p\pi} = I_c\frac{n_c}{\pi}, \tag{95}$$

где $n_c = \frac{Z_2}{2p}$ — число стержней на один полюс.

Задаваясь плотностью тока в стержне $s_c$ и в кольце $s_л$, получим их сечения

$$q_c = \frac{I_c}{s_c} \text{ и } q_л = \frac{I_л}{s_л}. \tag{96}$$

Обычно при одинаковых материалах стержня и кольца плотность тока в стержне выбирается несколько больше, чем в кольце. Величина выбираемой плотности тока зависит от задаваемых пусковых моментов, к. п. д. и номинального скольжения, а также от допустимой температуры обмотки ротора; обычно $s_c = 4 \div 6$ $а/мм^2$ и $s_л = 3 \div 5$ $а/мм^2$.

Более высокие плотности тока в роторе допускаются в тех случаях, когда желательно получить высокие пусковые моменты или повышенные номинальные скольжения.

Сечение стержня более правильно следует выбирать, исходя из заданных величин: 1) кратности пускового момента; 2) номинального скольжения с последующей проверкой на плотность тока и механическую прочность.

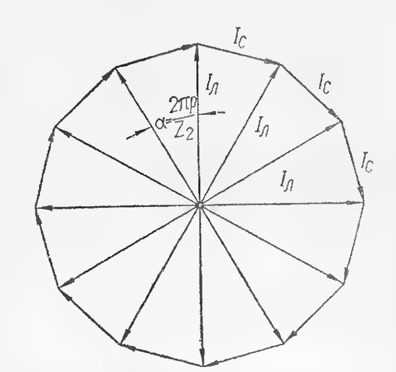


Рис. 218. Векторная диаграмма токов короткозамкнутого ротора.

$$s_N = \frac{I_{2N}' r_2'}{E_{10}} = \frac{I_2 r_2}{E_{20}} \approx r_2; \tag{97}$$

$$M_п = I_{п2}'^2 r_2'; \tag{98}$$

$$I_{п2}' \approx I_п - I_0; \tag{99}$$

$$I_{2N}' = I_{2N}\frac{m_2 w_2 k_{w_2}}{m_1 w_1 k_{w_1}};\ m_2 = Z_2;\ w_2 = \frac{1}{2};$$

$$M_п = \frac{p m_1 I_{п2}'^2 r_2'}{2\pi f}\ дж, \text{ или } M_п = \frac{p m_1 I_{п2}'^2 r_2'}{9{,}81 \cdot 2\pi f}\ кгм. \tag{100}$$

Из уравнения для кратности пускового момента (или мощности) и тока находим требуемую величину $r_2'$

$$r_2' = \frac{P_п}{m I_{2п}'^2}\ ом, \text{ или } r_2' = \frac{M_п}{M_N'}\frac{1}{\left(\frac{I_{п2}'}{I_N}\right)^2}\frac{U_{1N}}{I_N}. \tag{101}$$

* Величины, относящиеся к кольцу, снабжены индексом «л» (лобовая часть).

Здесь $P_п$ — пусковая мощность, *вт*, равная $M_п \frac{2\pi f_1}{p}$, если $M_п$ выражено в *дж*, или $M_п \frac{2\pi f_1}{p} \cdot 9{,}81$, если $M_п$ выражено в *кгм*;
$M'_N$ — единичный или базовый момент

$$\left.\begin{aligned} M'_N &= M_N \frac{1 - s_N}{\cos\varphi_N \eta_N} = \frac{pm_1 U_{1N} I_{1N}}{2\pi f_1} \; дж \\ &\text{или} \\ M'_N &= \frac{1}{2\pi f_1} \frac{p}{9{,}81} m_1 U_{1N} I_{1N} \; кгм \end{aligned}\right\}. \qquad (102)$$

Из условий заданного $s_N$ по (97) $\boldsymbol{r}_2 \approx s_N$ или $r'_2 = \boldsymbol{r}_2 \frac{U_{1N}}{I_{1N}}$ *ом*.

При известной величине $r'_2$ можно теперь определить сечение стержня и кольца следующим путем.

Сопротивление стержня при 75°С

$$r_c = \rho_{c75} \frac{l_c}{q_c}. \qquad (103)$$

Сопротивление кольца на длине одного пазового деления

$$r_л = \rho_{л75} \frac{l'_л}{q_л}, \qquad (104)$$

$$l'_л = \frac{\pi D_л}{Z_2}. \qquad (105)$$

Эквивалентное сопротивление ротора, приведенное к току стержня, определяется из равенства потерь

$$Z_2 r_c I_c^2 + 2 Z_2 I_л^2 r_л = Z_2 r_2 I_c^2, \qquad (106)$$

откуда, принимая во внимание (95),

$$r_2 = r_c + \frac{r_л}{2\sin^2 \pi \frac{p}{Z_2}} \approx r_c + \frac{Z_2^2}{2\pi^2 p^2} r_л = r_c + 2\left(\frac{n_c}{\pi}\right) r_л, \qquad (107)$$

или

$$r_2 = \rho_c \frac{l_c}{q_c} + \rho_л \frac{l'_л}{q_л} \frac{1}{2\sin^2\left(\frac{\pi}{2n_c}\right)} \qquad (108)$$

и далее, приведенное к сопротивлению статора

$$r'_2 = r_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{w_1}}{w_2 k_{w_2}}\right)^2 = r_2 \frac{4m_1 (w_1 k_{w_1})^2}{Z_2} = r_2 k, \qquad (109)$$

где

$$k = \frac{4m_1 (w_1 k_{w_1})^2}{Z_2}. \qquad (110)$$

При этом принято $k_{w_2} = 1$; $w_2 = \frac{1}{2}$ и $m_2 = Z_2$.



Принимая во внимание (107) и (109), получим искомое сечение стержня

$$q_c = \frac{\rho_c l_c (1 + k_л)}{r_2} \qquad (111)$$

или

$$q_c = \frac{\rho_c l_c (1 + k_л) k}{r'_2}, \qquad (112)$$

где

$$k_л = \frac{\text{сопротивление колец}}{\text{сопротивление стержней}} = \frac{r_л}{r_c 2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}},$$

или

$$k_л = \frac{D_л \rho_л q_c Z_2}{l_c \rho_c q_л 2\pi p^2}, \qquad (113)$$

т. е. зависит от отношения удельных сопротивлений и сечений кольца и стержня. Отношение сечений кольца и стержня может быть найдено, например, из условий равенства тепловых нагрузок стержней и колец

$$\frac{s_c^2 \rho_c q_c l_c Z_2}{\pi D l_c} = \frac{2 s_л^2 \rho_л \pi D_л q_л}{2\pi D_л 2(a + b)},$$

т. е.

$$\frac{q_л}{q_c} = \frac{s_c^2 \rho_c}{s_л^2 \rho_л} \frac{2(a + b)}{t_{1c}}, \qquad (114)$$

где $a$ и $b$ — стороны периметра кольца;

$$t_{1c} = \frac{\pi D}{Z_2}.$$

Исходя из равенства плотностей токов по (95)

$$\frac{q_л}{q_c} = \frac{I_л}{I_c} \approx \frac{Z_2}{2p\pi},$$

при этом по (113)

$$k_л \approx \frac{D_л \rho_л}{l_c \rho_c p}. \qquad (115)$$

После этого предварительного выбора сечения стержня и кольца по (111) и (115) выбираем окончательное сечение стержня (для незаливаемых роторов желательно применение стандартной меди, § 12-19), выбираем конструкцию и сечения колец, проверяя кольца на механическую прочность, и затем пересчитываем вторичные активные сопротивления по (107) и (109).

Относительное сопротивление

$$\boldsymbol{r}_2 = \frac{r'_2 I_N}{U_N} = \frac{\rho_c l_c (1 + k_л)}{q_c n_c} \frac{F_{1N}}{f \Phi_N}, \qquad (116)$$

где $F_{1N}$ — номинальная м. д. с. на полюс по (86) гл. 4. Сумма $r_1 + r_2$ численно должна быть равна задаваемым относительным потерям в меди статора и ротора по § 11-3

$$(r_1 + r_2) = \frac{p_{Cu1} + p_{Cu2}}{P_N}.$$

## 11-16. РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ РОТОРОВ

Пазовая проводимость при открытых, полузакрытых и круглых пазах и дифференциальное рассеяние (независимо от формы паза) рассчитываются, как показано в § 11-7, а также в гл. 4 и в примерах 3, 4, 5.

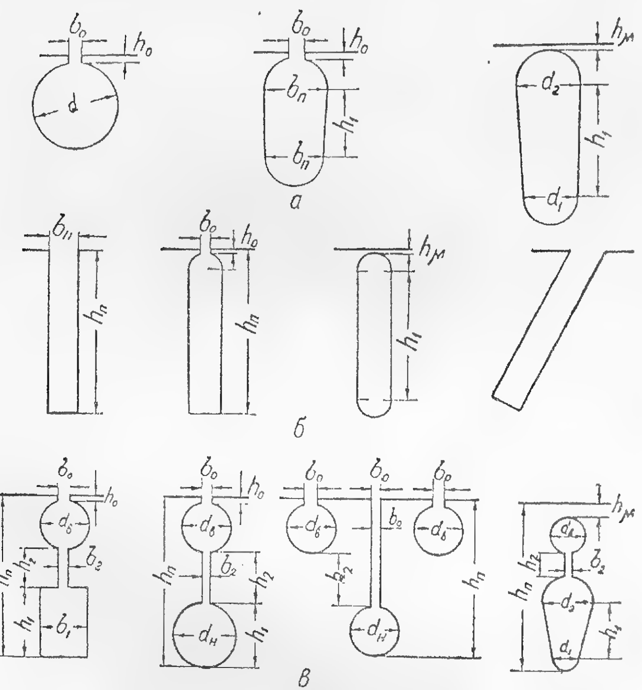



Рис. 219. Пазы ротора короткозамкнутых двигателей:

*а* — с нормальной клеткой; *б* — с глубоким пазом; *в* — двухклеточные и фигурные.

При закрытых пазах пазовая проводимость определяется следующим образом.

Полная проводимость закрытого паза (рис. 219)

$$\lambda_{п2} = \lambda_{п\mu} + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + 0{,}623. \tag{117}$$

Проводимость мостика на единицу длины

$$\lambda_{п\mu} = \frac{\mu' h_\mu}{d_2}. \tag{118}$$



Для определения относительной магнитной проницаемости $\mu'$ находят удельную м. д. с. в мостике, исходя из приближенной формулы

$$aw = H = \frac{I_c}{d_2}, \tag{119}$$

где $I_c$ — ожидаемый ток в стержне $I_c \approx I_{п2}$.

Затем по кривой намагничивания находят соответствующую $aw$ величину индукции $B$ с последующим определением магнитной проницаемости по формуле

$$\mu' = \frac{B}{\mu_0 H}. \tag{120}$$

Для определения $\lambda_{п\mu}$ можно также воспользоваться кривыми рис. 220 (для различных высот мостика $h_\mu$).

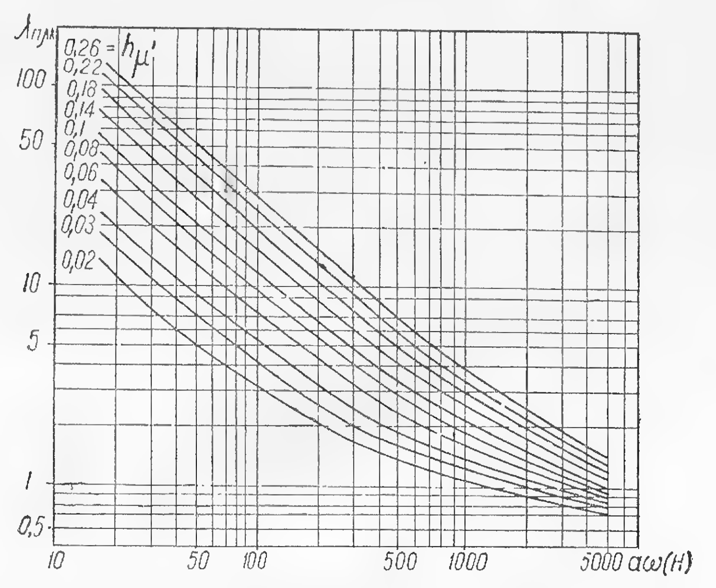



Рис. 220. К расчету рассеяния закрытых пазов.

Проводимость лобовой части $\lambda_{л2}$ по [102]

$$\lambda_{л2} = \frac{0{,}575\, D_л}{l_i Z_2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} \lg \frac{2{,}35 D_л}{a + b} \approx \frac{0{,}575 D_л Z_2}{p^2 \pi^2 l_i} \lg \frac{2{,}35 D_л}{a + b}, \tag{121}$$

где $(a + b)$ — полупериметр сечения кольца. Более простая формула для $\lambda_{л2}$ по [98]

$$\lambda_{л2} = k_{л2} \frac{Z_2 d}{2pl_i} \approx (0{,}08 \div 0{,}1)\, n_c \frac{\tau}{l_i}, \tag{122}$$

где $d$ — вылет стержня; $k_{л2} = 0{,}8 \div 0{,}9$.

Приведенное к сопротивлению статора реактивное сопротивление ротора равно

$$x_2' = 2\pi\mu_0 l_i f\,[\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2}]\,k^*, \qquad (123)$$

где $k$ по (110).

По гл. 4

$$\lambda_{\delta 2} = \frac{n_c \tau}{\pi^2 \delta'} k_{w2}^2 \sigma_{\delta 2} = \frac{0{,}82 t_2}{\pi^2 \delta'}\left(1 + \frac{b^2}{t_2^2} - 0{,}2\frac{b^4}{t_2^4}\right), \qquad (124)$$

где $b$ — скос паза $\left(\frac{b}{t_2} \leqslant 1\right)$; (для короткозамкнутых роторов $k_{w2} = 1$).

Относительное сопротивление

$$x_2 = \frac{x_2' I_N}{U_N} = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_N}{\Phi_N} \cdot \lambda_2, \qquad (125)$$

где $\lambda_2$ — проводимость рассеяния на полюс

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2}}{n_c}.$$

Обычно $x_2$ близко к $x_1$, а $x_1 + x_2$ должно быть близким к $x_к \approx \frac{1}{I_п}$, где $I_п$ — заданная кратность пускового тока.

Учет насыщения сказывается на уменьшении проводимости пазового рассеяния $\lambda_{п2}$ и проводимости рассеяния в зазоре $\lambda_{\delta 2}$ (см. гл. 4), но обычно влиянием насыщения при рабочих токах в первом приближении можно пренебречь. При пуске приближенный учет насыщения показан в примере 4.

## 11-17. ГЛУБОКОПАЗНЫЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Выбор числа зубцов производится по § 11-8.

Активное и реактивное сопротивление ротора рассчитывают сначала без учета вытеснения тока, т. е. для рабочего режима (малое скольжение) по (108) и (109):

$$r_2' = \left(\rho_c \frac{l_c}{q_c} + \rho_л \frac{l_л}{q_л} \frac{1}{2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}}\right) k \text{ ом}. \qquad (126)$$

или в долях единицы

$$r_2 = \rho_c \frac{l_c (1 + k_л)}{n_c \cdot q_c} \frac{F_N}{f \Phi_N}; \qquad (127)$$

$$x_2' = 2\pi\mu_0 f l_i (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2})\,k \text{ ом} \qquad (128)$$

---

* Формулы для реактивностей в короткозамкнутом роторе получаются из формул для фазного ротора (см. пример расчета 1), если подставить вместо $pq_2$ его величину из уравнения

$$2pq_2 m_2 = Z_2, \text{ т. е. } pq_2 = \frac{1}{2}, \text{ так как } Z_2 = m_2.$$



или в долях единицы

$$x_2 = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_N (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2})}{\Phi_N n_c}. \qquad (129)$$

Затем определяют параметры с учетом вытеснения тока. Активное сопротивление ротора с учетом вытеснения тока, приведенное к первичной обмотке,

$$r_2'(s) = \left(\rho_c \frac{l_c}{q_c} k_{гп}(s) + \rho \frac{l_л}{q_л} \cdot \frac{1}{2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}}\right) k \text{ ом}, \qquad (130)$$

где коэффициент сопротивления $k_{гп}(s)$ согласно рис. 39 является функцией скольжения $s$, так как

$$k_{гп} = \varphi(\xi), \text{ а } \xi = \sqrt{\frac{b_c \mu_0 2\pi f_1 s}{b_п 2\rho_c}}\, h_c = \xi(1)\sqrt{s}; \qquad (131)$$

при медных стержнях численно $\xi(1) = h_c \sqrt{\frac{f_1}{50}}$; $h_c$ — см.

При стержнях с удельным сопротивлением $\rho_c$

$$\xi(1) = h_c \sqrt{\frac{f_1}{50} \frac{\rho_{Cu}}{\rho_c}}.$$

Вытеснение тока в кольцах не принимается во внимание.

Реактивное сопротивление ротора с учетом вытеснения тока

$$x_2'(s) = 2\pi\mu_0 f l_i [\lambda_{п2} k_{xп}(s) + \lambda_{л2} + \lambda_\delta]\,k \text{ ом} \qquad (132)$$

или (гл. 4)

$$x_2'(s) = 2\pi\mu_0 f l_i [\lambda_{п2} k_{xп}(s) + \lambda_{л2}]\,k + x_{\delta 2}' \text{ ом}. \qquad (132а)$$

В относительных единицах

$$x_{2(s)} = \frac{x_2'(s) I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_N}{\Phi_N} \frac{\lambda_{п2} k_{xп}(s) + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2}}{n_c},$$

где согласно рис. 23

$$k_{xп}(s) = \frac{\lambda_{п2}(s)}{\lambda_{п2}} = \frac{\lambda_{п2}' k_{xп}'}{\lambda_{п2}' + \frac{h_0}{b_0}} \text{ —} \qquad (133)$$

отношение проводимостей паза с учетом и без учета вытеснения тока.

Рассчитанные таким образом параметры (с учетом и без учета вытеснения тока) должны быть проверены: 1) по пусковым условиям, 2) по заданному номинальному скольжению и 3) по кратности максимального момента. Первому условию должны удовлетворять параметры с учетом вытеснения тока (при $s = 1$), т. е. пусковой ток

$$I_п = \frac{U_1}{\sqrt{[r_1 + r_2'(1)]^2 + [x_1 + x_2'(1)]^2}} \qquad (134)$$

и пусковой момент

$$M_п = \frac{m_1 U_1^2 r_2'(1)}{[r_1 + r_2'(1)]^2 + [x_1 + x_2'(1)]^2} \tag{135}$$

должны быть равны заданным значениям.

Второму и третьему условиям должны удовлетворять параметры $x_2'$ и $r_2'$ без учета вытеснения тока, т. е., как и в предыдущем случае, должно быть:

$$M_{\max} \approx \frac{m_1 U_1^2 \left(1 - \frac{I_0}{I_к}\right)}{2(x_1 + x_2' c_1)} \text{ вт} \tag{136}$$

и

$$s_N = \frac{I_{2N}' r_2'}{E_{10}} \approx \frac{r_2' I_{1N}}{U_N}, \tag{137}$$

где $r_2'$ и $x_2'$ — активное и реактивное сопротивления без учета вытеснения тока.

На основании сказанного выбор размеров клетки и колец глубокопазного двигателя можно произвести следующим образом:

1. Определяем сечение стержня по заданной величине активного сопротивления $r_2'$ или, что то же, по величине номинального скольжения из (137), т. е. по (112)

$$q_с = \frac{\rho_с l_с (1 + k_л) k}{r_2'} \quad \text{или} \quad q_с = \frac{\rho_с l_с (1 + k_л) F_N}{r_2 n_с f \Phi_N}, \tag{138}$$

где $k_л$ по (115) и аналогично (97)

$$r_2' = \frac{s_N E_{10}}{I_{2N}} \approx s_N \frac{U_{1N}}{I_{2N}'},$$

причем

$$E_{10} \approx \frac{U_1}{c_1} \approx 0{,}95 U_1;$$

$$I_{2N}' = I_{2N} \frac{m_2 w_2 k_{w2}}{m_1 w_1 k_{w1}} = I_{2N} \frac{Z_2}{2 m_1 w_1 k_{w1}}. \tag{139}$$

Так как $m_2 = Z_2$ и $w_2 = \frac{1}{2}$, то ток в стержне

$$I_{2N} = I_с \approx \frac{P_2}{Z_2 E_{20} (1 - s_N) \cos\varphi_2}, \tag{140}$$

где $\cos\varphi_2 \approx 1$;

$$E_{20} = E_{10} \frac{w_2 k_{w_2}}{w_1 k_{w_1}} = \frac{E_{10}}{2 w_1 k_{w_1}} = \frac{B_{\delta N} v_a}{\sqrt{2}}. \tag{141}$$

Ток в кольце

$$I_л = \frac{I_с}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}} \approx \frac{I_с Z_2}{2 \pi p} = \frac{I_с n_с}{\pi}. \tag{142}$$



2. Задаваясь плотностью тока $s_л$, выбираем сечение кольца $q_л = \frac{I_л}{s_л}$, учитывая при этом достаточную механическую прочность кольца; далее рассчитываем сопротивление кольца $r_л$ по (104) и $r_2$ по (109) с проверкой по (138) при $k_л$ по (115).

3. Определяем требующееся активное и реактивное сопротивление стержня ротора при $s = 1$ из учета задаваемой величины пускового момента, а именно:

$$r_{с(s=1)}' = r_2'(1) - \frac{r_л'}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}};$$

при этом

$$r_2'(1) = \frac{P_п}{m I_{п2}'^2},$$

$$z_к \approx \frac{U_1}{I_{п_2}'}, \quad x_2'(1) \approx \sqrt{z_к^2 - [r_1 + r_2'(1)]^2}; \tag{143}$$

$$I_{п_2}' \approx I_{п_1} \frac{1}{1 + \sigma_2}; \quad \sigma_2 = \frac{x_2'}{x_m} \approx 0{,}05.$$

Получаем

$$x_2' - x_2'(1) = x_{п_2}' [1 - k_{xп}(1)], \tag{144}$$

где $x_{п_2}' = x_2' \frac{\lambda_{п_2}}{\sum \lambda_2}$; $x_2'$ по (128) или по (132) при $k_{xп} = 1$.

Требующееся уменьшение реактивности паза (при $s = 1$)

$$k_{xп}(1) = \left[1 - \frac{x_2' - x_2'(1)}{x_{п_2}'}\right] < 1.$$

Согласно сказанному выше

$$\frac{x_{п_2}'(1)}{x_{п_2}'} = k_{xп}(1) = \frac{\lambda_п' k_{xп}'(1) + \frac{h^0}{b_0}}{\lambda_п' + \frac{h_0}{b_0}}. \tag{145}$$

Сопротивления $r_2'$ и $r_л'$ при рабочем режиме были подсчитаны выше.

Сопротивление стержня при рабочем режиме

$$r_{с(s=s_N)}' = r_2' - r_л'.$$

По полученному выше значению $r_{с(s=1)}'$ находим отношение

$$\frac{r_{с(s=1)}''}{r_{с(s=s_N)}'} = k_{rп}(1).$$

По найденным отношениям $k_{xп}'(1) = \varphi_1(\xi)$, (рис. 23) и

$$k_{rп}(1) = \frac{r_с(1)}{r_с(0)} = \varphi(\xi), \text{ (рис. 39)}$$

выбираем окончательную величину $\xi$ и по (131) соответственно глубину паза ротора $h_п \approx h_с$, после чего подсчитываем точные значения всех параметров.

В заключение определяем величины пускового тока, пускового момента, максимального момента, коэффициента мощности и строим в случае надобности геометрическое место тока (рис. 240).

Выбранные размеры клетки необходимо также проверить на нагрев при пуске (достаточность теплоемкости клетки) по гл. 6.

Недостаток глубокопазного двигателя заключается в том, что при возрастании мощности глубина паза возрастает, и это приводит к увеличению рассеяния и уменьшению $\cos\varphi$.

В НИИЭМ под руководством Б. И. Кузнецова был разработан *двигатель с вытеснением тока в кольцах*, в котором клетка делается нормальной, но кольца окружаются ферромагнитным материалом.

При пуске основное сопротивление ротора получается за счет потерь в ферромагнитном кольце, окружающем рабочее кольцо. Благодаря этому получается высокий пусковой момент. При нормальной работе вследствие малого скольжения потери в роторе имеют место, главным образом, в стержнях малого сопротивления. Опыт и расчеты показывают, что в специальных случаях характеристики такого двигателя могут оказаться более благоприятными, чем характеристики двигателя с глубоким пазом.

### 11-18. ДВУХКЛЕТОЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Двухклеточный двигатель может быть построен на большую мощность, чем обыкновенный, благодаря сочетанию хороших пусковых и рабочих характеристик. Теория и методы расчета изложены в ряде работ [53], [98]. Ниже приводится более простой и вместе с тем более точный метод расчета пусковых и рабочих характеристик двухклеточного двигателя. В этом двигателе пусковая (верхняя) клетка должна иметь малое реактивное и большое активное сопротивление в соответствии с заданной величиной кратности пускового момента (рис. 243). Поэтому выгодно выбрать по возможности большое число пазов ротора, так как при этом уменьшается дифференциальное рассеяние. Пусковая клетка обыкновенно делается из круглых латунных или алюминиевых стержней, рабочая клетка — из медных стержней соответствующего профиля (рис. 219, *в*). Каждая клетка обыкновенно имеет свое короткозамыкающее кольцо.

При номинальной нагрузке (малое скольжение) токи в верхней и нижней обмотках распределяются обратно пропорционально их активным сопротивлениям.

Сопротивления пусковой и рабочей клетки $r'_{\text{в}}$ и $r'_{\text{н}}$, приведенные к первичной обмотке, рассчитываются по формулам § 11-15.

Для расчета реактивных сопротивлений исходим из эквивалентной схемы, представленной на рис. 221, где $z'_1 = z_1 c_1$. Реактивность рассеяния в зазоре $x''_{\delta_2} = x'_{\delta_2} c_1^2$ и реактивность от потока пазового открытия $x''_{\text{п.о}} = x'_{\text{п.о}} c_1^2$ (рис. 222) зависят от суммы токов верхнего и нижнего стержня, т. е. от $\dot{I}_2 = \dot{I}_{\text{в}} + \dot{I}_{\text{н}}$, поэтому они вынесены в цепь тока $I''_2 = \dfrac{I'_2}{c_1}$.



Уравнение для э. д. с. от потоков внутри паза

$$\dot{I}_{\text{н}}\left(\frac{r_{\text{н}}}{s} + jx_{\text{н}}\right) + (\dot{I}_{\text{н}} + \dot{I}_{\text{в}})\, jx_{\text{нв}} = \dot{I}_{\text{в}}\left(\frac{r_{\text{в}}}{s} + jx_{\text{в}}\right) + (\dot{I}_{\text{в}} + \dot{I}_{\text{н}})\, jx_{\text{нв}} = (\dot{I}_{\text{н}} + \dot{I}_{\text{в}})\, z_{2э}. \qquad (146)$$

Здесь $x_{\text{н}}$ — реактивность от потока рассеяния, связанного только с током $I_{\text{н}}$, т. е. на высоте $h_1$ и $h_2$ (рис. 222);

$x_{\text{в}}$ — реактивность от потока рассеяния, связанного только с током $I_{\text{в}}$, т. е. в области верхней клетки на высоте $h_3$ (без пазового открытия);

$x_{\text{нв}}$ — реактивность от потока взаимоиндукции внутри паза (как видно из уравнения (146), она может быть включена в общую цепь). Все реактивности отнесены к частоте питающей сети.

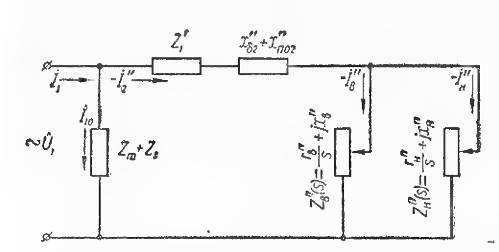



Рис. 221. Схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром асинхронного двигателя с двухклеточным ротором.

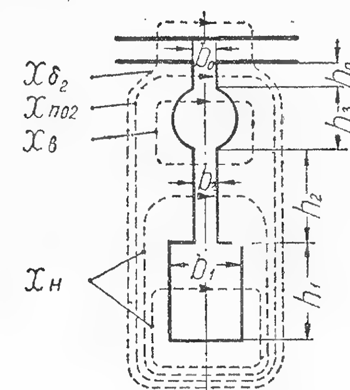



Рис. 222. Расчетная схема замещения асинхронного двигателя с двухклеточным ротором.

Из уравнения (146) получаем

$$\frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{н}}} = \frac{r_{\text{н}} + jx_{\text{н}} s}{r_{\text{в}} + jx_{\text{в}} s} \qquad (147)$$

и эквивалентный импеданс двух клеток

$$z_{2э} = \frac{\left(\dfrac{r_{\text{н}}}{s} + jx_{\text{н}}\right)\left(\dfrac{r_{\text{в}}}{s} + jx_{\text{в}}\right)}{\dfrac{r_{\text{в}} + r_{\text{н}}}{s} + j(x_{\text{в}} + x_{\text{н}})}, \qquad (148)$$

откуда эквивалентные сопротивления

$$\frac{r_{2э}(s)}{s} = \frac{r_{\text{в}}^2 r_{\text{н}} + r_{\text{н}}^2 r_{\text{в}} + s^2 (x_{\text{в}}^2 r_{\text{н}} + x_{\text{н}}^2 r_{\text{в}})}{(r_{\text{в}} + r_{\text{н}})^2 + (x_{\text{н}} + x_{\text{в}})^2 s^2}\,\frac{1}{s} \qquad (149)$$

и

$$x_{2э}(s) = \frac{s^2 (x_{\text{в}}^2 x_{\text{н}} + x_{\text{н}}^2 x_{\text{в}}) + r_{\text{в}}^2 x_{\text{н}} + r_{\text{н}}^2 x_{\text{в}}}{(r_{\text{в}} + r_{\text{н}})^2 + (x_{\text{н}} + x_{\text{в}})^2 s^2}. \qquad (150)$$

Обычно величиной $x_{\text{в}}$ пренебрегают. Как видно из (149) и (150), это пренебрежение недопустимо, в особенности при вычислении $x_{2э}$, так как малая величина $x_{\text{в}}$ умножается на большую величину $x_{\text{н}}^2$.

Расчет $x_н$ и $x_в$ можно произвести по формулам* для обычных клеток

$$x_н = 2\pi f\mu_0 l_i(\lambda_{п.н}+\lambda_{л.н}); \tag{151}$$

$$x'_н = x_н\cdot k;\quad x''_н = x'_н c_1^2;\quad c_1 = 1+\frac{x_1}{x_m};\quad k \text{ по (110)};$$

$\lambda_{п.н} = \frac{1}{3}\frac{h_1}{b_1}+\frac{h_2}{b_2}$ (рис. 222) или $\lambda_{п.н}=0,623+\frac{h_2}{b_2}$ для круглого стержня.

Учет вытеснения тока может быть произведен умножением $\lambda_{п.н}$ на величину $k_{xп}(s)$ по (133);

$$x_в = 2\pi f\mu_0 l_i\left[0,623\left(\frac{1}{1+\frac{b_2}{d_в}}\right)+\lambda_{л.в}\right]; \tag{152}$$

$$x'_в = x_в k;\quad x''_в = x'_в c_1^2.$$

При этом величина в круглых скобках представляет коэффициент уменьшения проводимости верхнего паза и зависит от отношения ширины щели $b_2$ к диаметру верхнего стержня $d_в$.

Реактивность от потока пазового открытия ротора (индекс 2 опускаем)

$$x_{п.о} = 2\pi f\mu_0 l_i\lambda_{п.о};\quad x'_{п.о}=x_{п.о}k;\quad x''_{п.о}=x'_{п.о}c_1^2; \tag{153}$$

$$\lambda_{п.о}=\frac{h_0}{b_0}$$

(при закрытом пазе $\lambda_{п.о}=\lambda_{п\mu}$ по формуле (118).

Дифференциальная реактивность

$$x_{\delta_2}=2\pi f\mu_0 l_i\lambda_{\delta_2}, \tag{154}$$

где $\lambda_{\delta_2}$ по формуле (124).

Полное вторичное приведенное реактивное сопротивление

$$x'_2(s) = x'_{\delta_2}+x'_{п.о}+x'_{2э}(s), \tag{155}$$

где $x_{2э}(s)$ находим по (150) и вторичное активное сопротивление по (149)

$$r'_{2э}(s)=r'_2(s)=r_2(s)k; \tag{156}$$

$$x''_2(s) = x''_{\delta_2}+x''_{п.о}+x''_{2э}(s)=x'_2(s)c_1^2;\quad r''_{2э}=r'_2(s)c_1^2.$$

В случае необходимости учета вытеснения тока значения $r_н$ и $r_в$ умножаются на $k_{rп}(s)$, а $x_н$ и $x_в$ — на $k_{xп}(s)$.

Уравнения для $r'_2(s)$ и $x'_{2э}(s)$ можно представить в удобном для анализа виде, если ввести отношения:

$$\alpha\approx\frac{r_в}{r_н}=\frac{r'_в}{r'_н}=\frac{r''_в}{r''_н},\quad \beta=\frac{x_н}{r_н},\quad \gamma=\frac{x_в}{x_н}. \tag{157}$$

При этом получаем

$$\frac{r_2(s)}{s}=\frac{r_в}{s}c_r(s) \quad\text{и}\quad x_{2э}(s)=x_н c_x(s),$$

* При общих кольцах в (151) и (152) надо положить $\lambda_{л.в}=\lambda_{л.н}=0$, но включить $x_л$ в цепь тока $\dot I_2=\dot I_н+\dot I_в$, т. е. прибавить $x_{\delta_2}$ и $x_{п.о}$, то же и при вычислении $r_н$, $r_в$.



где

$$c_r(s)=\frac{1+\frac{1}{\alpha}+\beta^2s^2(1+\gamma^2\alpha)}{\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)^2+\beta^2s^2(1+\gamma)^2} \tag{158}$$

и

$$c_x(s)=\frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2+\beta^2s^2\gamma(1+\gamma)+\gamma}{\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)^2+\beta^2s^2(1+\gamma)^2}. \tag{159}$$

Если в числителе пренебречь $\gamma^2\alpha$ и $\gamma$ по сравнению с единицей, то

$$c_r(s)\approx\frac{1+\frac{1}{\alpha}+\beta^2s^2}{\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)^2+\beta^2s^2(1+\gamma)^2} \tag{160}$$

и

$$c_x(s)\approx\frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2+\beta^2s^2\gamma(1+\gamma)}{\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)^2+\beta^2s^2(1+\gamma)^2}. \tag{161}$$

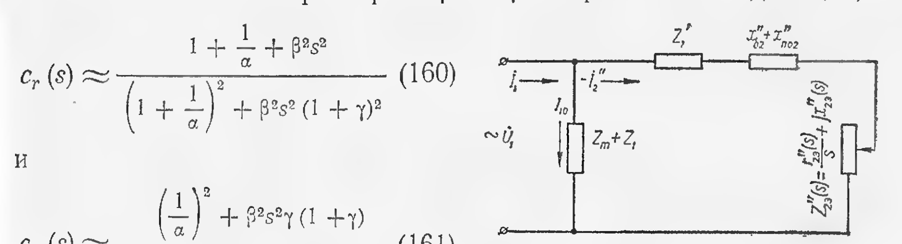



Рис. 223. К определению реактивностей рассеяния двухклеточного ротора.

Аналитический расчет токов, момента и $\cos\varphi$ в функции скольжения. Согласно схеме замещения двухклеточного двигателя, представленной на рис. 223, вторичный ток

$$I''_2c_1 = I'_2(s)=\frac{U_1}{r_1+\frac{c_1r'_2(s)}{s}+j\left[x_1+c_1x'_2(s)\right]}; \tag{162}$$

модуль

$$I'_2(s)=\frac{U_1}{\sqrt{\left[r_1+\frac{c_1r'_2(s)}{s}\right]^2+\left[x_1+c_1x'_2(s)\right]^2}}=\frac{U_1}{|z(s)|}; \tag{163}$$

активная и реактивная составляющие:

$$I'_{2a}(s)=I'_2(s)\cos\varphi_2,\quad I'_{2p}(s)=I'_2(s)\sin\varphi_2,$$

где

$$\cos\varphi_2=\frac{r_1+c_2\frac{r_2'(s)}{s}}{|z(s)|}\quad\text{и}\quad\sin\varphi_2=\frac{x_1+x_2'(s)}{|z(s)|}.$$

Первичный ток

$$\dot I_1(s)=\dot I_{10}+\left(-\frac{1}{c_1}\dot I'_2\right)=\dot I_{10}-\dot I''_2;$$

модуль

$$I_1(s)=\sqrt{\left[I_{10a}+\frac{1}{c_1}I'_{2a}(s)\right]^2+\left[I_{10p}+I'_{2p}(s)\frac{1}{c_1}\right]^2}. \tag{164}$$

Момент вращения

$$M(s) = \frac{m\,[I_2'(s)]^2}{s}\, r_2'(s) \text{ синхронных вт}, \qquad (165)$$

$$\cos\varphi = \frac{I_{10a} + \frac{1}{c_1}\, I_{2a}'(s)}{I_1(s)}\,. \qquad (166)$$

Примечания: 1. Для построения рабочих и пусковых характеристик $I_2(s)$, $M(s)$, $I_1(s)$ и т. д. все вычисления удобно свести в таблицу (см. пример 5).

2. Величину $c_1 = 1 + \sigma_1$ согласно § 11-14 в большинстве случаев можно полагать равной единице.

Упрощенный графический метод. Из уравнений (149) и (150) для режима малых скольжений можно пренебречь членами с $s^2$, т. е.

$$r_2(s) = \frac{r_в r_н}{r_в + r_н} = r_н \frac{1}{1+\alpha}\,;\quad \alpha = \frac{r_н}{r_в}\,. \qquad (167)$$

Вторичное сопротивление $r_2$ при этом не зависит от скольжения и равно сопротивлению параллельно включенных верхней и нижней клеток. Реактивное сопротивление из (150), если пренебречь членами с $s^2$ и величиной $r_н^2 x_в$, равно

$$x_{2э}(s) = x_н' \left(\frac{r_в}{r_в + r_н}\right)^2 = x_н' \left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^2. \qquad (168)$$

Таким образом, по эквивалентной схеме для режима малых скольжений получаем «рабочий круг» вторичного тока с диаметром

$$D_р = \frac{U_1}{x_\sigma + x_н'' \left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^2} \qquad (169)$$

и током холостого хода

$$I_{10} = \frac{U}{c_1 z_m}\,; \qquad (170)$$

при этом

$$x_\sigma = c_1 x_1 + c_1^2 (x_{\delta_2}' + x_{п.о}') \approx x_1 + x_{\delta_2}' + x_{п.о}'; \qquad x_н'' = x_н' c_1^2. \qquad (171)$$

Для режима больших скольжений можно пренебречь активным сопротивлением нижней клетки по сравнению с ее большим реактивным сопротивлением и получить эквивалентную схему рис. 224, из которой, вынося контур нижней клетки на зажимы (рис. 225), получаем диаметр вторичного «пускового круга»

$$D_п = \frac{U_1}{c_1' x_\sigma + c_1' x_в'}\,;\quad c_1' = 1 + \frac{x_\sigma}{x_н''}\,; \qquad (172)$$

в первом приближении можно положить $x_в' = 0$, тогда

$$D_п = \frac{U_1}{c_1' x_\sigma}\,. \qquad (173)$$

Идеальный ток холостого хода для пускового круга

$$I_{02п} = \frac{U_1}{z_0} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(x_н'' c_1')^2 + (r_1' c_1')^2}}\,. \qquad (174)$$



Тангенс угла поворота вектора $I_{02п}$

$$\operatorname{tg}\alpha_п = \frac{r_1'}{x_н''}\,, \qquad (175)$$

а тангенс угла поворота пускового круга

$$\operatorname{tg}\gamma_{2п} \approx 0. \qquad (176)$$

Точка $s = 1$ определится по углу $\operatorname{tg}\alpha = \frac{r_в' c_1'}{x_\delta + x_в c_1'}$.

Построение упрощенной диаграммы показано на рис. 242.

Выбор размеров пусковой и рабочей клетки по заданным пусковым и рабочим характеристикам.

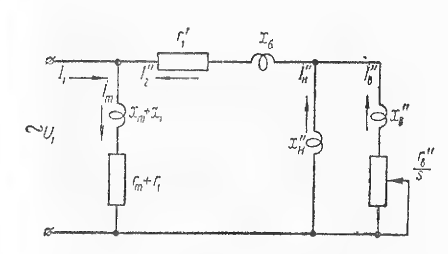


Рис. 224. Схема замещения двухклеточного асинхронного двигателя для больших скольжений.

Рис. 225. Схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром двухклеточного асинхронного двигателя для больших скольжений.

Размеры пусковой (верхней) клетки определяются тремя основными условиями:

а) кратностью задаваемого пускового момента;

б) кратностью пускового тока;

в) условиями нагрева при пуске (т. е. характеристикой момента сопротивления в функции скорости, суммарным маховым моментом двигателя и приводного механизма и т. д.).

Размеры рабочей нижней клетки определяются желаемой или допустимой величиной номинального скольжения двигателя и, соответственно, величиной его к. п. д., а также, отчасти желаемой формой пусковой характеристики и нагревом клетки в номинальном режиме двигателя. Как увидим ниже, выбор обеих клеток должен быть произведен совместно.

*Пусковая клетка.* Из условий задаваемых величин пускового момента $M_п = P_п$, если момент выражен в синхронных ваттах, или $M_п = P_п \cdot \frac{p}{2\pi f \cdot 9{,}81}$ *кгм* и пускового тока $I_{1п}$ получаем требующиеся активные и реактивные сопротивления при пуске ($s = 1$)

$$r_2'(1) = \frac{P_п}{m I_{2п}'^2}\,, \qquad (177)$$

где $I'_{2п}$ — пусковой ток вторичной цепи (двух клеток, приведенных к первичной). Ориентировочно можно принять

$$I'_{2п} \approx \frac{I_{1п}}{1+\sigma_2} \approx 0{,}95\ I_{1п},$$

где $I_{1п} = \frac{U}{z_к}$ — первичный пусковой ток $a$.

Величину $z_к$ получаем по заданной величине $I_{1п}$

$$z_к = \frac{U_1}{I_{1п}}.$$

Согласно эквивалентной схеме требуемая величина $x'_{2э}$ при $s=1$

$$x'_{2э}(1) = \sqrt{z_к^2 - [r_1 + r'_2(1)]^2} - x_\sigma, \tag{178}$$

где

$$x_\sigma = x_1 + x'_{\delta_2} + x'_{п.о}.$$

Примечание. Проверка на нагрев при заданной величине постоянной инерции может быть произведена по гл. 6, откуда объем клетки может быть найден по допустимой температуре клетки при пуске вхолостую или под нагрузкой.

Параметры пусковой и рабочей клеток могут быть выбраны правильно лишь при совместном учете пусковых и рабочих характеристик. Определим требующееся активное и реактивное сопротивление вторичной цепи при рабочем режиме (при малых скольжениях):

$$r_2(s_N) = \frac{s_N E_{20}}{I_{2N}};\quad r'_2(s_N) = r_2(s_N)\,k,$$

где

$$I_{2N} \approx \frac{P_{2N}}{Z_2 E_{20}(1-s_N)\cos\varphi_{2N}} \tag{179}$$

($\cos\varphi_{2N}$ полагаем равным 1),

$$E_{20} = E_1 \frac{w_2 k_{w_2}}{w_1 k_{w_1}} \approx 0{,}95 U_1 \frac{0{,}5}{w_1 k_{w_1}}.$$

Так как величина скольжения мала, то согласно уравнениям (147) и (167) имеем:

$$I_{н_{s=s_N}} = I_{2_{s=s_N}} \frac{1}{1+\alpha}, \tag{180}$$

$$I_{в_{s=s_N}} = I_{2_{s=s_N}} \frac{\alpha}{1+\alpha} \tag{181}$$

и

$$r_н = r_{2_{s=s_N}}(1+\alpha);\qquad r_в = \alpha r_н. \tag{182}$$

Реактивное сопротивление при $s = s_N$ согласно (168) равно

$$x'_{2э}(s_N) = \frac{x'_н}{(1+\alpha)^2}. \tag{183}$$

Желаемая величина $x'_{2э}(s_N)$ может быть определена либо из задаваемой кратности максимального момента, либо из задаваемой величины $(\cos\varphi)_{max}$. Согласно уравнению (62), принимая во внимание только рабочий круг,

$$M_{max} \approx \frac{mU_1^2}{2(x_\sigma + x'_{2э})\,c}, \tag{184}$$

где

$$x_\sigma = x_1 + x'_{\delta_2} + x'_{п.о};\quad c = 1 + c_1 + c_2 + \frac{r_1}{x_\sigma + x_{2э}} \approx \frac{I_п}{I_п - I_0}.$$

При $x'_{2э} = 0$ максимальный момент был бы равен

$$M_{max0} = \frac{mU_1^2}{2x_\sigma c}. \tag{185}$$

Из этих уравнений следует, что

$$x'_{2э}(s_N) = x_\sigma\left(\frac{M_{max0}}{M_{max}} - 1\right). \tag{186}$$

Таким образом, мы определим четыре желаемые величины:

$$r'_2(1);\quad x'_{2э}(1);\quad r'_2(s_N)\ \text{и}\ x'_{2э}(s_N).$$

Из уравнений (149) и (150) в первом приближении, пренебрегая $r_н$ и $x_в$ по сравнению с $r_в$ и $x_н$, можно получить сопротивление верхнего стержня в виде:

$$r'_в = r'_2(1)\left[1 + \frac{x'^2_{2э}(1)}{r'^2_2(1)}\right] \tag{187}$$

и, далее, получить требуемое отношение

$$\alpha = \frac{r'_н}{r'_в} = \frac{r'_2(s_N)}{r'_в - r'_2(s_N)}, \tag{188}$$

так как по (167)

$$\frac{1+\alpha}{\alpha} = \frac{r'_в}{r'_2(s_N)}.$$

Из (168) следует, что

$$x'_н = x'_{2э}(s_N)(1+\alpha)^2\ \text{и}\ r'_н = \alpha r'_в = (1+\alpha)\,r'_2(s_N). \tag{189}$$

Таким образом, получаем приближенные отношения

$$\alpha = \frac{r'_н}{r'_в},\ \beta = \frac{x'_н}{r'_н}\ \text{и}\ \gamma = \frac{x'_в}{x'_н}.$$

Значение $x'_в$ может быть определено, так как согласно (152) эта величина не зависит от размеров стержня; для ее определения необходимо только выбрать вылет стержня [см. (122) и (152)]; кроме того, вначале ввиду малости $x'_в$ может быть положен равным нулю.

После приближенного выбора величин $\alpha$, $\beta$ и $\gamma$ уточняем $r'_в$ и $x'_н$ по формулам (158) и (159), т. е.

$$r'_в = \frac{r'_2(1)}{c_r(1)},\quad x'_н = \frac{x'_{2э}(1)}{c_x(1)};\quad r'_н = \alpha r'_в.$$

Получив желаемые активные и реактивные сопротивления верхней и нижней клеток, выбираем, как показано ниже, сечения клеток и их форму и, далее, подсчитываем точные значения параметров и коэффициентов $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, после чего по табл. 69 или по рис. 242 определяем значения пускового тока, а также пускового и максимального моментов. В случае неудовлетворительного соответствия заданию изменяем параметры в желаемом направлении и повторяем расчет (см. пример расчета).

Определение размеров и параметров клеток. Сечение верхнего стержня аналогично (112)

$$q_{\text{в. с}} = \frac{\rho_{\text{в. с}} l_{\text{в. с}} (1 + k_{\text{л. в}})}{r'_{\text{в}}} k, \tag{190}$$

где $k_{\text{л. в}}$, как и в случае нормального короткозамкнутого двигателя, ориентировочно может быть определено по (113), т. е.

$$k_{\text{л. в}} = \frac{D_{\text{л. в}} \rho_{\text{л. в}}}{l_{\text{в. с}} \rho_{\text{в. с}} p} \approx 0{,}3 \div 0{,}5 \tag{191}$$

или (там же)

$$k_{\text{л. в}} \approx \frac{4(a+b)}{l_{\text{в. с}}}; \tag{192}$$

$k$ по (110).

Проверяем величину плотности тока в номинальном режиме

$$s_{\text{в. с}} = \frac{I_{\text{в. с}}}{q_{\text{в. с}}} \approx \frac{I_{2N}}{q_{\text{в. с}}} \cdot \frac{\alpha}{1+\alpha}. \tag{193}$$

По сечению выбираем стандартный стержень и определяем его точное сопротивление

$$r'_{\text{в. с}} = \rho_{\text{в. с}} \frac{l_{\text{в. с}}}{q_{\text{в. с}}} k. \tag{194}$$

Сопротивление верхнего кольца

$$r'_{\text{в. л}} = r'_{\text{в. с}} k_{\text{л. в}} 2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}, \tag{195}$$

откуда его сечение

$$q_{\text{в. л}} = \frac{\rho_{\text{в. л}} \pi D_{\text{в. л}} k}{Z_2 r'_{\text{в. л}}}. \tag{196}$$

Проверяем сечение на необходимую механическую прочность (сечение кольца должно быть достаточным для укрепления стержней).

По сечению выбираем размеры кольца (см. рис. 237, 239, 241) и длину вылета, после чего подсчитываем точное значение сопротивления кольца

$$\frac{r'_{\text{в. л}}}{2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} = \rho_{\text{в. л}} \frac{\pi D_{\text{в. л}} k}{Z_2 q_{\text{в. л}} 2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}}, \tag{197}$$

а затем и точное сопротивление всей верхней клетки

$$r'_{\text{в}} = r'_{\text{в. с}} + \frac{r'_{\text{в. л}}}{2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}}. \tag{198}$$



Нижняя клетка рассчитывается аналогично. Сечение стержня

$$q_{\text{н. с}} = \frac{\rho_{\text{н. с}} l_{\text{н. с}} (1 + k_{\text{л. н}})}{r'_{\text{н}}} k, \tag{199}$$

где $k_{\text{л. н}}$ по (191).

Плотность тока в рабочем режиме

$$s_{\text{н. с}} = \frac{I_{\text{н}}}{q_{\text{н. с}}} = I_{2N} \frac{1}{1+\alpha} \frac{1}{q_{\text{н. с}}}. \tag{200}$$

Выбираем сечение и его форму и подсчитываем точное значение $r'_{\text{н. с}}$

$$r'_{\text{н. с}} = \rho_{\text{н. с}} \frac{l_{\text{н.с}} \cdot k}{q_{\text{н. с}}}. \tag{201}$$

Желательное сечение кольца может быть определено из равенства

$$r'_{\text{н. л}} = r'_{\text{н. с}} k_{\text{л. н}} 2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}, \tag{202}$$

откуда сечение кольца

$$q_{\text{н. л}} = \frac{\rho_{\text{н. л}} \pi D_{\text{н. л}} k}{Z_2 r'_{\text{н. л}}}. \tag{203}$$

Проверяем сечение на необходимую механическую прочность и плотность тока

$$s_{\text{н. л}} = \frac{I_{\text{н. л}}}{q_{\text{н. л}}}, \tag{204}$$

где ток в нижнем кольце

$$I_{\text{н. л}} = \frac{I_{2N}}{(1+\alpha) 2\sin \frac{\pi p}{Z_2}}. \tag{205}$$

Выбираем окончательное сечение и подсчитываем точное значение сопротивления нижней клетки

$$r'_{\text{н}} = r'_{\text{н. с}} + \frac{r'_{\text{н. л}}}{2\sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}}. \tag{206}$$

Далее определяем реактивные сопротивления $x'_{\text{н}}$, $x'_{\text{в}}$ по формулам (151) и (152) и вторичные сопротивления $r'_2 = r_{\text{в}} c_r(s)$, $x_{2э} = x'_{\text{н}} c_x(s)$ и проверяем, как сказано выше, величины $I_{\text{п}}$, $M_{\text{п}}$, $M_{max}$. Подсчитывая $c_r(s)$ и $c_x(s)$ в функции скольжения, получаем кривые рис. 213.

Пусковой ток

$$I_{\text{п}1} = \frac{U_1 c_2}{\sqrt{[r_1 + r'_2(1)]^2 + [x_\sigma + x'_{2э}(1)]^2}}; \quad I'_{\text{п}2} \approx \frac{I_{\text{п}1}}{c_2}, \tag{207}$$

где $c_2 = 1 + \sigma_2 = 1 + \frac{x'_2}{x_m}$.

Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = m I'^2_{\text{п}2} r'_2(1) = m I'^2_{\text{п}2} r'_{\text{в}} c_r(1) \quad \textit{синхронных вт}, \tag{208}$$

или

$$M_{п} = m\, I'^{2}_{п2} r'_{в} c_r(1) \cdot \frac{p}{2\pi f \cdot 9{,}81}\ кгм.$$

Максимальный момент может быть точно определен построением кривой $M(s)$ по точкам или из круговой диаграммы (см. пример расчета). Приближенно, как и в (184),

$$M_{\max} \approx \frac{mU_1^2}{2\left[x_\sigma + x'_{н}\left(\frac{1}{1+\ }\right)^2\right]c}\ синхронных\ вт. \quad (209)$$

Пусковые характеристики могут быть подсчитаны аналитически или графически, как это было указано выше (см. пример расчета).

### 11-19. ДВИГАТЕЛЬ С ФИГУРНЫМ ПАЗОМ (ФИГУРНОПАЗНЫЙ)

Фигурные пазы бутылочной или трапецевидной формы (рис. 226) для расчета параметров могут быть приведены к эквивалентному глубокому пазу высотой

$$h = \frac{q_{c}}{b}, \quad (210)$$

где $q_{c}$ — сечение фигурного стержня;

$b$ — ширина верхней узкой части (обычно $b \approx b_0$).

При бутылочной форме (высота нижней части $h_1$, ширина $b_1$), проводимость рассеяния [98], [39] определяется для малых скольжений по формуле

$$\lambda_{п} = \lambda_{пl} + \frac{h_0}{b_0}, \quad (211)$$

где

$$\lambda_{пl} = \frac{h}{3b}\left[1 + \frac{b_1}{b}\left(\frac{h_1}{h}\right)^3 - \left(\frac{b_1}{b}\,\frac{h_1}{h}\right)^3\right].$$

Рис. 226. К расчету фигурного паза.

Для больших скольжений учитывается уменьшение $\lambda_{пl}$ от вытеснения тока путем введения коэффициента уменьшения $k_{x\xi}$ (рис. 23), зависящего от приведенной высоты проводника $\xi$

$$\xi = h\sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\rho_{c}}\,s},$$

где $s$ — скольжение, $\rho_{c}$ — удельное сопротивление стержня для данного проводникового материала.

$$\lambda_{п\xi} = \lambda_{пl}\, k_{x\xi} + \frac{h_0}{b_0}. \quad (212)$$

При $\xi > 3$ $k_{x\xi} \approx \frac{3}{2\xi}$; при $\xi = 1{,}5$ $k_{x\xi} \approx 0{,}9$; при $\xi \leqslant 1$ $k_{x\xi} \approx 1$.



Если нижняя утолщенная часть имеет форму круга, то она приводится к эквивалентному по площади квадрату, сторона которого равна

$$b_1 = 0{,}855d.$$

Если фигурный паз имеет трапецевидную форму, то при определении $k_{r\xi}$ приближенно его можно привести к глубокому, приняв

$$h = \frac{q_{c}}{b} = \frac{(b_0 + b_{\max})\, h_{c}}{2b}, \quad (213)$$

где $h_{c}$ — высота трапецевидного стержня;

$$b \approx 0{,}85b_0 + 0{,}15b_{\max}. \quad (214)$$

Проводимость паза определится по (212), при этом для $\lambda_{пl}$ справедлива формула для прямоугольного паза $\lambda_{пl} = \frac{1}{3}\,\frac{h_{c}}{3b_{п}}$, если вместо $b_{п}$ подставить минимальную ширину $b_{п\,\min} = b_0$ при условии, если $\frac{b_0}{b_{\max}} \geqslant 0{,}3$ и $\frac{h_{c}}{b_0} \geqslant 3$.

Активное сопротивление стержня $r_{c\xi}$ рассчитывается как для эквивалентного глубокого паза

$$r_{c\xi} = \rho_{c}\frac{l_{c}}{q_{c}} k_{r\xi}. \quad (215)$$

Коэффициент увеличения сопротивления $k_{r\xi}$ зависит от величины $\xi$ (рис. 39). Для $\frac{b_1 h_1}{bh} < 0{,}75$ и $\xi \leqslant 1{,}5$ (область малых скольжений) можно принять

$$k_{r\xi} \approx 1 + \frac{4}{45}\xi^4, \quad (216)$$

для скольжений, при которых $\xi > 2$,

$$k_{r\xi} = \xi. \quad (217)$$

Активные и реактивные сопротивления определяются по (107), (109) и (123).

Согласно [39] применяются бутылочные стержни, размеры которых приведены в табл. 67. Вариант расчета дан в примере 5.

*Таблица 67*

**Размеры стержней короткозамкнутых двигателей с бутылочным пазом**

| Обозначения | Размеры (в *см*) | | | |
|---|---|---|---|---|
| $d$ | 1,05 | 1,20 | 1,80 | 2,00 |
| $b$ | 0.40 | 0,40 | 0,50 | 0,55 |
| $h_1$ | 1.20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| $h$ | 3,35 | 4,00 | 6,30 | 6,85 |
| $b_1$ | 0.93 | 1.06 | 1,60 | 1,77 |
| $q_{c}$ | 1,34 | 1,61 | 3,14 | 3,74 |

## 11-20. ДВИГАТЕЛЬ С МАССИВНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ (ДВИГАТЕЛЬ ШЕНФЕРА)

Асинхронные машины с массивным ротором находят все большее применение в особенности в тех случаях, когда необходима или желательна высокая скорость вращения. При массивном роторе возможно достигнуть высоких окружных скоростей и увеличить мощность на единицу веса машины [88].

В отдельных случаях этот двигатель обладает преимуществами вследствие высокой надежности конструкции ротора или вследствие подходящих механических характеристик. Ниже показано, что характеристики массивнороторного двигателя сильно зависят от его геометрических размеров. В малых машинах получаются мягкие характеристики; в крупных машинах (например, турбогенераторах с массивным ротором) асинхронные характеристики получаются весьма жесткими. Исследование свойств машин с массивным ротором является необходимым не только для асинхронных машин, но и для синхронных машин (турбогенераторов с массивным ротором, синхронных компенсаторов и двигателей, снабженных массивными полюсами или массивными полюсными наконечниками).

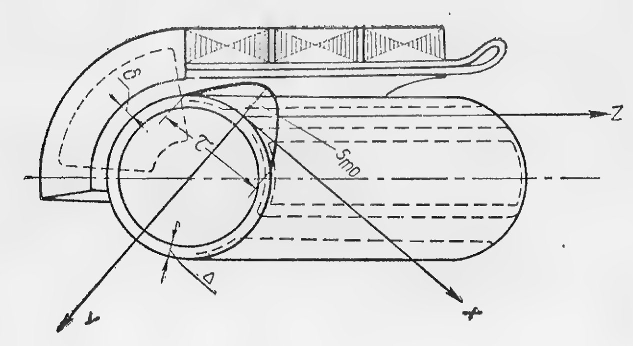



Рис. 227. К расчету эквивалентных, приведенных к статору параметров массивного ферромагнитного ротора.

П р и б л и ж е н н а я   т е о р и я. Статор (нормальный, трехфазный) при питании током частоты $f$ создает синусоидальные волны м. д. с., бегущие со скоростью $v_\nu = 2\tau_\nu f$, где $\tau_\nu$ — полюсное деление какой-либо $\nu$-гармонической. Мы рассматриваем только основную волну ($\nu = 1$). Волна м. д. с. создает соответствующую волну индукции, которая при движении относительно ротора со скоростью $\omega = \omega_1 s$ индуктирует в нем токи, создающие собственное поле. Результирующее поле, аналогично случаю обычного асинхронного двигателя, при взаимодействии с током ротора создает вращающий момент. Основное различие между массивным ферромагнитным ротором и шихтованным ротором, имеющим обмотку, уложенную в пазы, состоит в том, что в ферромагнитном роторе обмотка является распределенной и параметры ее зависят от частоты и величины тока. При высокой частоте токи и поле ротора образуются в поверхностном слое незначительной глубины $\Delta$. При частотах, близких к нулю, поле глубже проникает в тело ротора. Простые расчеты показывают, однако, что при ферромагнитном роторе уже при частотах скольжения порядка 2—3% от $f_1 = 50$ *гц* проникновение потока достигает всего величины порядка 1—2 *см*, а при частоте 50 *гц*, т. е. в момент пуска, эта глубина составляет около 2 *мм*. Поэтому будет справедливо всегда представлять себе обмотку в виде токонесущего слоя толщиной $\Delta$ (рис. 227). Определение параметров этой обмотки, приведенных к обмотке статора, требует знания закона распределения тока и поля в роторе.

Эту задачу можно решить только приближенно при следующих допущениях:

1) магнитная проницаемость постоянна (учет непостоянства магнитной проницаемости может быть сделан впоследствии, например, по [76];



2) ротор имеет большую длину по сравнению с полюсной дугой, и токи имеют только аксиальное направление (учет сопротивления лобовой части может быть сделан впоследствии, например, по методу [142].

При указанных предположениях к области, занятой током ротора, применимы уравнения

$$\mathrm{rot}\,\dot H = \dot s = \frac{\dot E}{\rho}; \quad \mathrm{rot}\,\dot E = -\frac{\partial \dot B}{\partial t} = -j\omega\mu \dot H. \tag{218}$$

Так как $\dot E = \rho \dot s$, то $\mathrm{rot}\,\dot s = -j\frac{\mu\omega}{\rho}\dot H$, где $\dot s$ — плотность тока, имеющая только одну составляющую $s_z$ в осевом направлении, $\dot H$ — напряженность магнитного поля, $\dot B$ — индукция; $\dot H$ и $\dot B$ имеют составляющие по осям $x$ (тангенциальное направление) и $y$ (направление в глубь ротора), $H_z$ и $B_z$ равны нулю (рис. 227).

Применяя операцию $\mathrm{rot}\,\mathrm{rot}\,\dot H = -\nabla^2 \dot H$ для вихревого вектора $\dot H$, получим:

$$\frac{\partial^2 \dot H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot H}{\partial y^2} = j\frac{\mu\omega}{\rho}\dot H = k^2 \dot H. \tag{219}$$

Аналогично для $\dot s$ и $\dot E$

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot s}{\partial y^2} &= j\frac{\mu\omega}{\rho}\dot s = k^2 \dot s \\ \frac{\partial^2 \dot E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot E}{\partial y^2} &= j\frac{\mu\omega}{\rho}\dot E = k^2 \dot E \end{aligned}\right\}, \tag{220}$$

где $k^2 = j\frac{\mu\omega}{\rho}$. (221)

Из уравнения (218) находим

$$\mathrm{rot}_z\,\dot H = \dot s,$$

или

$$\frac{\partial \dot H_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot H_x}{\partial y} = \dot s_z = \dot s. \tag{222}$$

Решение уравнений для $\dot H$, $\dot B$, $\dot s$ и $\dot E$, как известно, имеет один и тот же вид. Например, для $\dot H$

$$\dot H = \dot C e^{-\beta y} \dot F(x), \tag{223}$$

где $\dot F(x)$ — функция $x$ в координатной системе, вращающейся вместе с ротором

$$\dot F(x) = \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x + \varphi\right) \text{ или } \dot F(x) = e^{-j\frac{\pi}{\tau}x}.$$

Подстановка (223) в исходные уравнения дает

$$\beta^2 = k^2 + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 = j\frac{\mu\omega}{\rho} + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 \approx (1+j)^2\frac{\mu\omega}{2\rho} + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2, \tag{224}$$

откуда, пренебрегая $\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2$,

$$\beta \approx \alpha(1+j),$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2\rho}} = \frac{1}{\Delta}.$$

Здесь $\Delta$ представляет «глубину проникновения» и, следовательно, уравнения будут иметь вид

$$\left.\begin{aligned} \dot H &= e^{-(1+j)\alpha \cdot y}\,\dot C_H e^{j\frac{\pi}{\tau}x} \\ \dot s &= e^{-(1+j)\alpha \cdot y}\,\dot C_s e^{j\frac{\pi}{\tau}x} \\ \dot E &= e^{-(1+j)\alpha \cdot y}\,\dot C_E e^{j\frac{\pi}{\tau}x} \end{aligned}\right\}. \tag{225}$$

Так как $E_y = 0$ и $E_x = 0$, то

$$\operatorname{rot}_x E = -j\omega B_x = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial E_z}{\partial y};$$
$$\operatorname{rot}_y E = -j\omega B_y = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial E_z}{\partial x}. \qquad (226)$$

Учитывая (218) и (223), получим

$$B_x = -j\frac{\rho}{\omega}\frac{\partial s}{\partial y} = -\frac{j\rho}{\omega}\beta e^{-\beta y}\dot{C}_s e^{j\frac{\pi}{\tau}x}; \qquad (227)$$

$$B_y = -j\frac{\rho}{\omega}\frac{\partial \dot{s}}{\partial x} = -\frac{j\rho}{\omega}e^{-\beta y}\lambda\frac{\pi}{\tau}\dot{C}_s e^{j\frac{\pi}{\tau}x}. \qquad (228)$$

Отношение модулей тангенциальной и нормальной составляющих индукции в теле ротора

$$\frac{B_x}{B_y} = \frac{\sqrt{2}\gamma\tau}{\pi}. \qquad (229)$$

П о т е р и, в ы д е л я е м ы е н а е д и н и ц у п о в е р х н о с т и р о т о р а. Амплитуда плотности тока на поверхности ротора

$$s_{m0} = \frac{B_{y0}v}{\rho}, \qquad (230)$$

где $v = \tau\frac{\omega}{\pi} = 2\tau f$ — скорость движения волны;

$B_{y0}$ — нормальная составляющая результирующей индукции на поверхности ротора.

Для рассматриваемой единицы поверхности движение синусоидальной волны со скоростью $\omega$ будет эквивалентно существованию *переменного тангенциального поля* в соответствии с уравнением (229)

$$H_{x0} = B_{y0}\frac{\sqrt{2\lambda}}{\mu\pi}\tau. \qquad (231)$$

Изменение этого поля по направлению в глубь ротора происходит по (225), т. е. имеет место убывание по экспоненциальному закону

$$\dot{H}_x = \dot{H}_{x0}e^{-(1+j)\alpha y}. \qquad (232)$$

Действующее значение $H$ убывает по закону $H = H_{x0}e^{-\alpha y}$.

Аналогично

$$\dot{s} = \frac{\dot{s}_{m0}}{1+j}e^{-(1+j)\alpha y}; \qquad (233)$$

$$s = \frac{s_{m0}}{\sqrt{2}}e^{-\alpha y}. \qquad (234)$$

Потери на единицу поверхности

$$w = \int_0^\infty s^2\rho\,dy = \frac{s^2_{m0}\rho}{4\alpha} \qquad (235)$$

или, что одно и то же,

$$w = \frac{1}{2}H^2_{m0}\alpha\rho. \qquad (236)$$

Учитывая соотношение (229), получаем

$$H_{m0}\sqrt{\mu\rho} = \frac{B_{y0}\tau}{\pi}\sqrt{\omega_2}. \qquad (237)$$



Формулы (235)—(237) являются весьма важными для расчета, так как связывают нормальную индукцию на поверхности ротора с частотой ротора ($\omega_2$) и полюсным делением машины ($\tau$), а также с параметрами ротора ($\mu\rho$) и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ротора. Следует не упускать из виду, что везде речь идет о *результирующих* величинах $H$ и $B$, получающихся в результате наложения внешнего вынуждающего поля и поля вихревых токов ротора. Векторное сложение поля в расточке, за исключением пограничного слоя, происходит так же, как и в случае обычного асинхронного двигателя (рис. 228).

Таким образом, двигатель с массивным ротором мы приводим к известной эквивалентной схеме обычного асинхронного двигателя (рис. 229). Следовательно, задача заключается в определении приведенных к первичной цепи вторичных параметров машины.

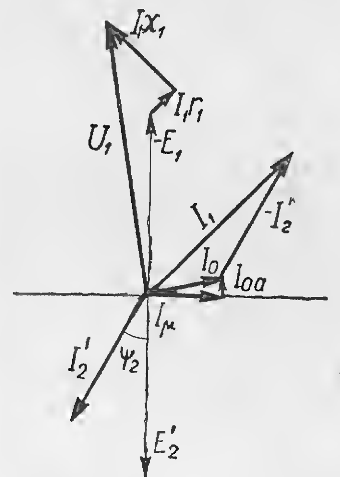



Рис. 228. Векторная диаграмма двигателя с массивным ротором.

О п р е д е л е н и е п р и в е д е н н ы х п а р а м е т р о в р о т о р а в с о о т в е т с т в и и с о с х е м о й р и с. 2 2 9. Как известно, амплитуда м. д. с. ротора в приведенных величинах

$$F_2 = \frac{\sqrt{2}\,m_1 I_2' w_1 k_{w1}}{\pi p} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}A_2\tau k_w, \qquad (238)$$

где $A_2$ — линейная нагрузка.

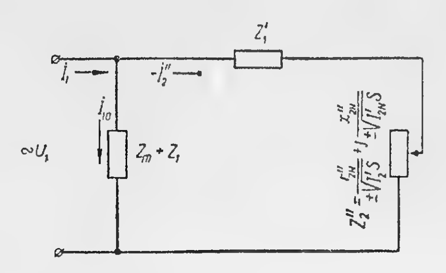



Рис. 229. Схема замещения асинхронного двигателя с массивным ферромагнитным ротором.

С другой стороны, при синусоидальном распределении тока по полюсному делению (рис. 227) из закона полного тока имеем

$$F_2 = \frac{1}{2}\int_0^\tau H_l dl = \frac{2}{\pi}\frac{s_{m0}}{\alpha}\frac{\tau}{2}\frac{1}{\sqrt{2}}. \qquad (239)$$

Приравнивая (238) и (239), получаем приведенный к фазной обмотке статора ток ротора

$$I_2' = \frac{s_{m0}\tau}{\pi\alpha\sqrt{2}}c, \qquad (240)$$

где

$$c = \frac{\pi p}{m_1\sqrt{2}\,w_1 k_{w1}} = \text{const}. \qquad (241)$$

Приравнивая джоулевы потери по уравнению (235) величине $m_1 I_2'^2 r_2'$, получаем

$$m_1 I_2'^2 r_2' = \pi D l\frac{s_{m0}\rho}{4\alpha}. \qquad (242)$$

Подставляя, далее, значение $I_2$ из (240) и учитывая (241), получаем искомую приведенную величину вторичного сопротивления

$$r_2' = \frac{2\pi^2 a^2}{m_1 \tau^2 c^2}\,\tau D l\,\frac{\rho}{4a} = \frac{2m_1 (wk_{w1})^2}{p}\,\frac{a\rho l}{\tau}. \qquad (243)$$

Для учета сопротивления лобовых частей ротора (рис. 227) введем коэффициент увеличения сопротивления $k_л$, зависящий от отношения $\beta = \frac{\tau}{l}$ и равный $1 + a_1'\beta$, где $a_1' \approx \frac{2}{\pi}$. Тогда получим

$$r_2' = \frac{2m_1 (w_1 k_{w1})^2}{p}\,a\rho\,\frac{1+a_1'\beta}{\beta} = \frac{2m_1 (w_1 k_{w1})^2}{p}\,a\rho k_\beta, \qquad (244)$$

где $k_\beta$ — коэффициент, учитывающий сопротивление лобовой части и величину $\beta$

$$k_\beta = \frac{1 + a_1'\beta}{\beta}.$$

Как известно, полное сопротивление

$$z_2 = r_2' (a_r + ja_x) = r_2' a_r \left(1 + j\,\frac{a_x}{a_r}\right) = r_2 + jx_2, \qquad (245)$$

где $a_r = a_x = 1$, если не учитывать изменения магнитной проницаемости и потерь на гистерезис. В случае необходимости этого учета можно ввести коэффициенты [76]

$$a_r = 1{,}4 \text{ и } a_x = 0{,}85, \qquad (246)$$

т. е.

$$x_2 = \frac{a_x}{a_r} r_2 \approx 0{,}6 r_2, \qquad (247)$$

если считать, что влияние лобовой части на $r_2'$ и $x_2'$ одинаково и выражается коэффициентом $k_л = 1 + a_1'\beta$;

$$z_2 = r_2' \left(1 + j\,\frac{a_x}{a_r}\right) a_r \approx r_2' a_r (1 + j0{,}6). \qquad (248)$$

Эквивалентная схема двигателя представлена на рис. 229. Полное сопротивление контура намагничивающего тока $z_m$ можно принять так же, как и в нормальном двигателе, равным $x_m$ и независимым от скольжения, так как из закона полного тока * следует, что

$$x_m \approx x_{m(s\to 0)}$$

(здесь и далее через $s$ обозначено скольжение).

Как видно из уравнения (244), вторичные параметры являются функцией глубины проникновения и магнитной проницаемости, а следовательно, частоты и вторичного тока, т. е.

$$r_2'(s) = a_r k_\beta \frac{2m_1 (w_1 k_{w1})^2}{p} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_1 \rho}{2}}\,\sqrt{\mu' s}, \qquad (249)$$

где $\mu'$ — относительная магнитная проницаемость;
$s$ — скольжение.

Видно, что вторичные параметры, активное и реактивное сопротивление $r_2'(s)$ и $x_2'(s)$ зависят от значения $\sqrt{\mu' s}$. Относительная магнитная проницаемость $\mu'$ на поверхности ротора зависит от напряженности магнитного поля на поверхности ротора $H_{m0}$, а эта последняя зависит от силы вторичного тока $I_2'$. Таким образом, в эквивалентной схеме двигателя с массивным ротором

* Из рис. 227 следует, что при $s$, не равном нулю, интеграл по пути взаимоиндукции равен $\dot F = \dot F_1 + \dot F_2 \approx H_{\delta_0} 2\delta \approx F_{1(s=0)}$, если пренебречь падениями магнитного потенциала в железе.



вторичные параметры являются функцией тока. Определение тока может быть произведено методом последовательных приближений. Сначала можно задаться ожидаемой величиной $\mu'$ при ожидаемой величине тока. Получив ток, следует проверить $\mu'$ и в случае расхождения изменить первоначально принятую проницаемость. Однако можно определить $\mu'$ и не пользуясь методом последовательных приближений (см. ниже).

Относительную магнитную проницаемость можно представить в функции напряженности поля $H$ [76]

$$\mu' = \frac{k_2}{H^{1-\frac{1}{n}}}\left(1 - e^{-\alpha_2 H^m}\right) + \mu_H'. \,* \qquad (250)$$

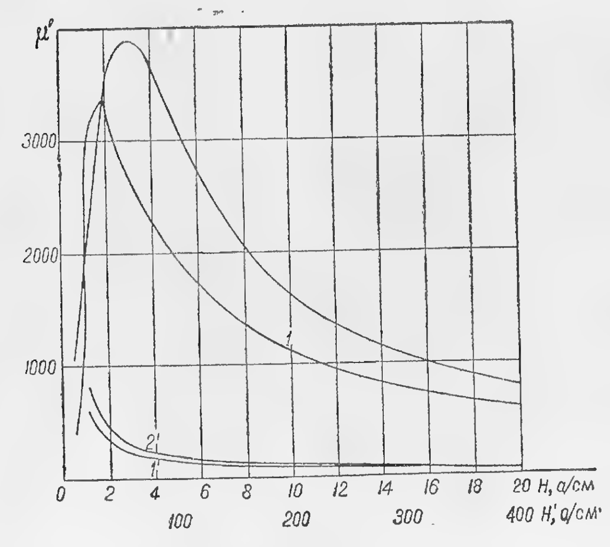



Рис. 230. Изменение относительной магнитной проницаемости $\mu'$ в слабых и сильных полях:
*1* и *1'* — опытные кривые, *2* и *2'* — расчетные кривые.

Здесь показатель $n$ по [76] зависит от вида кривой $\mu' = f(H)$ для данного сорта материала и изменяется обычно в пределах $10 \div 20$; $k_2$, $m$ и $\alpha_2$ — постоянные, определяемые по данной кривой намагничивания; $\mu_H'$ — относительная магнитная проницаемость при $H \to 0$.

На рис. 230 показаны кривые $\mu' = f(H)$. Кривая *1* получена по характеристике намагничивания для стального литья, кривая *2* — построена по уравнению (250).

Для больших индукций (кривые *1'* и *2'*) можно считать, что

$$\mu' = \frac{B_{к_1}}{\mu_0 H} + 1 \qquad (251)$$

(для обычных сортов стали, как известно, $B_{к_1} \approx 2$ $вб/м^2$,

$$\mu'_H = 1 \text{ и при } H \to \infty \quad 1 - \frac{1}{n} \to 1).$$

Согласно (239) получаем

$$H_{m0} = A_{2m} = \frac{s_{m0}}{\sqrt{2a}} = \frac{I_2' \pi}{\tau c}. \qquad (252)$$

* Здесь мы расширяем область кривой, рассматриваемую Л. Р. Нейманом.

Это же следует непосредственно из закона полного тока. Относительная магнитная проницаемость вместо (250) приближенно будет иметь вид

$$\mu' = \frac{B_{\text{к}_1}}{\mu_0 H}\left(1 - e^{-a_2 H^m}\right) + 1$$

или

$$\mu' = \frac{B_{\text{к}_1} \tau c}{\mu_0 I_2' \pi}\left[1 - e^{-a_2\left(\frac{I_2' \pi}{\tau c}\right)^m}\right] + 1. \tag{253}$$

Расчеты показывают, что уже при сравнительно малых токах ротора (токах холостого хода) можно считать $e^{-a_2\left(\frac{I_2'\pi}{\tau c}\right)^m} \approx 0$ и в пределах от $I_2' = I_{20}'$ до $I_2 = I_{2\text{к}}'$ практически допустимо считать

$$\mu' = \frac{B_{\text{к}1} \tau c}{\mu_0 I_2' \pi} = \frac{B_{\text{к}1} \tau \pi p}{\mu_0 I_2' \pi m_1 \sqrt{2}\, w_1 k w_1} = \frac{B_{\text{к}1} \tau}{\mu_0 \pi F_{1N} I_2'} = \frac{B_{\text{к}1}}{\mu_0 \sqrt{2}\, A_N k_{w_1} I_2'} = \frac{\mu_\text{к}'}{I_2'}. \tag{254}$$

Здесь $I_2' = \frac{I_2'}{I_{1N}}$ — относительный вторичный ток, $\mu_\text{к}'$ — некоторая условная относительная магнитная проницаемость (постоянная величина), причем

$$\mu_\text{к}' = \frac{B_{\text{к}1}}{\mu_0 \sqrt{2}\, A_N k_{w_1}}. \tag{255}$$

Физически $\mu_\text{к}'$ представляет относительную магнитную проницаемость железа при токе в роторе, равном (в приведенных значениях) номинальному току статора, т. е. $I_2' = 1$ и $s = 1$.

Подставляя найденное значение $\mu'$ в уравнение (249) и учитывая вынесение намагничивающего контура на зажимы в схеме замещения, получим

$$r_2''(s) = a_r k_\beta \frac{2m_1 (w_1 k_{w_1})^2 c_1^2}{p} \sqrt{\frac{\mu_\text{к}' \mu_0 \omega_1 \rho}{2 I_2'}} \sqrt{s} = \frac{r_{2N}'' \sqrt{s}}{\sqrt{I_2'}}, \tag{256}$$

где

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}; \quad r_{2N}'' = \frac{1}{p} a_r k_\beta 2m_1 (w_1 k_{w_1})^2 c_1^2 \sqrt{\frac{1}{2} \mu_\text{к}' \mu_0 \omega_1 \rho}. \tag{257}$$

Из эквивалентной схемы и уравнения (256) получаем

$$\frac{r_2''(s)}{s} = \frac{r_{2N}''}{\pm \sqrt{s} \sqrt{I_2'}}. \tag{258}$$

Вторичный ток, приведенный к первичному,

$$I_2'' = \frac{U_1}{c_1 (r_1 + j x_1) + \frac{r_2''}{s}\left(\pm 1 + j \frac{a_x}{a_r}\right)}, \tag{259}$$

где знак «плюс» соответствует двигательному режиму, знак «минус» — генераторному; $c_1 r = r_1'$; $c_1 x_1 = x_1'$.

Решение уравнения (259) находится ниже графическим путем для любого значения $s$. При этом удобно вычислить $I_2''$ в долях номинального тока статора. Параметры $x_1$, $r_1$ и напряжение $U_1$ также должны быть выражены в долях единицы. При этих условиях по (257) относительная величина сопротивления ротора

$$r_{2N}'' = \frac{1}{p} a_r k_\beta 2m_1 (w_1 k_{w_1})^2 c_1^2 \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\text{к}' \rho \omega_1}{2}} \cdot \frac{I_{1N}}{U_N} \tag{260}$$



или в другом виде

$$r_{2N}'' = \frac{1}{p} a_r k_\beta \frac{2m_1 (w_1 k_{w_1})^2 c_1^2 I_{1N} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\text{к}' \rho \omega_1}{2}}}{\pi \sqrt{2}\, \Phi_N w_1 k_{w_1} f} = \frac{F_N}{\Phi_N} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\text{к}' \rho \pi}{f}}\, a_r k_\beta c_1^2. \tag{261}$$

Подставляя в (261) $\mu_\text{к}$ по (255), получаем

$$r_{2N}'' = 0{,}0485\, k_r k_\text{л} c_1^2 \sqrt{\frac{A \quad k_w 50}{500 \cdot 0{,}95 \tau}\frac{0{,}85 \cdot 10^{-4}}{B_{\delta N}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{Fe}} 50}{2 \cdot 10^{-5} f_1}} \cdot \sqrt{s}, \tag{261a}$$

где

$$k_r \approx 1{,}3; \quad k_\text{л} = 1 + \frac{2\tau}{\pi l}; \quad B_{\delta N} - \frac{\textit{вб}}{\textit{см}^2}.$$

Реактивное сопротивление ротора

$$x_2'' = \frac{k_x}{k_r} r_2'',$$

где $k_x \approx 0{,}85$.

Положим $B_{\text{к}_1} = 2$ *вб/м²*, $A_N = 250$ *а/см*, $k_w = 0{,}95$. Тогда по (255)

$$\mu_\text{к}' = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{2} \cdot 250 \cdot 0{,}95} \approx 47{,}6.$$

По формуле (238) имеем

$$\frac{F_{1N}}{\Phi_N} = \frac{A_N k_{w_1}}{\sqrt{2}\, B_{\delta N}} = \frac{250 \cdot 0{,}95}{\sqrt{2} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 25} = 8{,}4 \cdot 10^4$$

(номинальная индукция взята 8000 *гс*, длина машины 25 *см*).

При этих данных и при $\rho = \rho_{\text{Fe}} = 2 \cdot 10^{-5}$ *омсм* получим для $f = 50$ *гц* (считая величины $k_\beta$, $a_r$ и $c_1$ равными единице)

$$r_{2N}'' = \sqrt{\frac{1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 47{,}6 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{50}} \cdot 8{,}4 \cdot 10^4 = 0{,}073 \text{ (или 7,3 \%)}.$$

Пусть при этом $r_1 = 0{,}02$; $\frac{a_x}{a_r} = 1$; $x_1 = 0{,}1$; $U_1 = 1$; тогда по (259) получим вторичный ток в долях номинального

$$\dot{I}_2'' = \frac{1}{0{,}02 + j\,0{,}1 + \frac{0{,}073}{\sqrt{I_2' s}}(\pm 1 + j)}$$

или

$$I_2'' = \frac{1}{\sqrt{\left(0{,}02 \pm \frac{0{,}073}{\sqrt{I_2' s}}\right)^2 + \left(0{,}1 + \frac{0{,}073}{\sqrt{I_2' s}}\right)}}.$$

**Приближенный метод расчета рабочих характеристик массивнороторного двигателя.**

Определяем по (257), (261) или (261a) значение $r_{2N}''$ при $\mu' = \mu_\text{к}'$ по (255). Это значение $r_{2N}''$ можно считать постоянным в области от холостого хода до номинальной нагрузки или небольшой перегрузки (1,5—2). В области больших токов ($I_1 > 5 \div 6$) необходимо вичислять $r_2''$ по (258)

$$r_2''(1) = \frac{r_{2N}''}{\sqrt{I_1}}, \tag{262}$$

где $I_1$ — ожидаемая кратность пускового тока.

Так как ток при пуске в пределах $1 > s > s_\text{к}$ изменяется незначительно, то в этом диапазоне скольжений возможно принять

$$\frac{r_2''(s)}{s} = \frac{r_{2N}''}{\sqrt{s I_1}}. \tag{263}$$

В области $0 < s < s_\text{к}$ можно принять $I_1 = 1$.

Таким образом, в первом приближении характеристику $I_2 = f(s)$ можно определить по уравнению

$$I_2'' = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1' + \frac{r''_{2N}}{\sqrt{I_1 s}}\right)^2 + \left(x_1' + \frac{x''_{2N}}{\sqrt{I_1 s}}\right)^2}}. \tag{264}$$

(При этом должно быть приближенно $I_1 \approx I_{10} + I_2''$).

Выражение (264) может быть принято общим при определенном значении кратности тока $I_1$.

Момент вращения

$$M = I_2''^2 \frac{r_2''(s)}{s} = \frac{U^2 \frac{r''_{2N}}{\sqrt{I_1 s}}}{\left(r_1' + \frac{r''_{2N}}{\sqrt{I_1 s}}\right)^2 + \left(x_1' + \frac{x''_{2N}}{\sqrt{I_1 s}}\right)^2} \tag{265}$$

$$\left(M_{\text{ед}} = M_N' = \frac{3U_1 I_{1N}}{2\pi f_1} p \quad \text{дж}\right).$$

Максимум момента получится при опрокидывающем или критическом скольжении $s_к$, определенном из уравнения $\frac{\partial M}{\partial s} = 0$ в виде

$$s_к = \left(\frac{r''_{2N}}{x_1'}\right)^2 \frac{1 + a^2}{1 + \rho_1^2}, \tag{266}$$

где $\rho_1 = \frac{r_1'}{x_1'}$, $a = \frac{x''_{2N}}{r''_{2N}}$ по (247).

Подставляя (266) в (265), получим

$$M_{\max} = \frac{U^2}{2x_1' \left[a + \rho_1 + \sqrt{(1 + a^2) + (1 + \rho_1^2)}\right]}, \tag{267}$$

т. е. $M_{\max}$ не зависит от абсолютных величин $r''_{2N}$ и $x''_{2N}$, а только от их отношения. При малых активных сопротивлениях ($\rho_1 = 0$) и при $a = 1$

$$M_{\max} = \frac{U^2}{4{,}82 x_1'}. \tag{268}$$

При указанном выше значении $a = 0{,}6$ и $\rho_1 = 0$

$$M_{\max} = \frac{U^2}{3{,}54 x_1'}. \tag{269}$$

Весьма важно иметь в виду следующее. Относительная величина $r''_{2N}$ в малых массивнороторных машинах получается больше $x_1'$ и, следовательно, $s_к$ по (266) получается много больше единицы. С ростом мощности $r''_{2N}$ быстро падает, а $s_к$ и вид механической характеристики приближаются к таковым для двигателей с нормальной клеткой. Расчет рабочих характеристик можно произвести и при переменном значении вторичных параметров путем решения относительно $I_2''$ уравнения

$$I_2'' = \frac{U^2}{\sqrt{\left(r_1' + \frac{r''_{2N}}{\sqrt{I_2'' s}}\right)^2 + \left(x_1' + \frac{x''_{2N}}{\sqrt{I_2'' s}}\right)^2}}. \tag{270}$$

Решение возможно следующим путем: задаваясь рядом произвольных значений $\sqrt{I_2'' s}$ в ожидаемых пределах, получим соответствующие значения $I_2''$, $s = \frac{(\sqrt{I_2'' s})^2}{I_2''}$, и далее $I_2'' = f_1(s)$, $M = f_2(s)$.

$$I_1 = \sqrt{(I_2'' \cos \varphi_2)^2 + (I_{10} + I_2'' \sin \varphi_2)^2}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{M}{U I_2''},$$

где $U$, $I_2''$, $M$ в долях единицы.



Влияние омеднения ротора [109] может быть учтено путем подключения к схеме замещения параллельного контура, представляющего активное сопротивление покрытия

$$r_п = \frac{\rho_п l b_к}{\pi D_r \Delta_п} k, \tag{271}$$

где $\Delta_п$ — толщина покрытия;

$\rho_п$ — удельное сопротивление;

$D_r$ — диаметр ротора;

$$k = 4m (w_1 k_{w_1})^2 \frac{I_{1N}}{U_{1N}}; \quad k_л = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{l}.$$

Индуктивностью покрытия можно пренебречь. Омеднение ротора приводит к уменьшению сопротивления ротора и повышению полезной мощности [109].

Потери на поверхности от высших гармонических можно подсчитать по формулам гл. 5, а нагрев поверхности по известным потерям по гл. 6.

Влияние на параметры отношения $\frac{\delta}{\tau}$ было исследовано в [87]. При этом оказалось, что выражение для $x_2''(s)$ и $r_2''(s)$ по (260) и (261) надо умножить на коэффициент

$$k_{\delta s} = \frac{2}{1 + \left(1 + \frac{\pi^2 \delta \sqrt{\mu' \rho'}}{\tau^2 \sqrt{s}}\right)^2}, \tag{272}$$

де $\rho'$ — относительное по отношению к меди удельное сопротивление материала ротора.

Влияние нагрева ротора сказывается на увеличении активного сопротивления и возрастании скольжения. При сильном повышении температуры ротора полезная мощность двигателя сильно падает

$$P_2 = M(1 - s)\left(\frac{P_N}{2\pi f_1} p\right) \text{вт}. \tag{273}$$

Для уточнения расчета и дальнейшего усовершенствования характеристик двигателя необходимо исследование влияния на параметры ротора магнитных и электрических свойств материала в условиях вращающихся полей. Это влияние может быть учтено опытными поправками $k_x$ и $k_r$ к использованным выше формулам [88]. В частности, опыт показывает, что величина $a$ не остается постоянной, но зависит от скольжения.

Геометрическое место тока ротора. Рассмотрим полученное уравнение тока ротора

$$I_2'' = \frac{U_1}{r_1' + jx_1' + (j \pm 1) r_2'' \frac{1}{\sqrt{s I_2'}}} = \frac{U_2 \sqrt{s}}{(r_1' + jx_1')\sqrt{s} + (j \pm 1)\frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}}}, \tag{274}$$

где $r_1' = r_1 c_1$; $x_1' = x_1 c_1$.

Сравним это уравнение с уравнением окружности в символической форме

$$\dot{V} = \frac{\dot{C} + p\dot{D}}{\dot{A} + p\dot{B}},$$

причем параметр $p$ будет соответствовать $\sqrt{s}$,

$$\dot{C} = c_1 + jc_2 = 0,$$

$$\dot{D} = d_1 + jd_2 = U_1,$$

$$\dot{A} = a_1 + ja_2 = (j \pm 1)\frac{r_2'}{\sqrt{I_2''}},$$

$$\dot{B} = b_1 + jb_2 = r_1 + jx_1.$$

Если $\dot{V} = \eta - j\xi$, то координаты центра окружности ($\eta_0$, $\xi_0$) и ее радиус $R$ определяются соотношениями:

$$\xi_0 = \frac{1}{2}\frac{a_3}{a_2}; \quad \eta_0 = \frac{1}{2}\frac{a_4}{a_2}; \qquad R = \sqrt{\xi_0^2 + \eta_0^2 + \frac{a_1}{a_2}},$$

где

$$a_1 = c_2 d_1 - c_1 d_2 = 0;$$

$$a_2 = a_1 b_2 - a_2 b_1 = \pm \frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}} x_1 - \frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}} r_1;$$

$$a_3 = (d_1 a_1 + d_2 a_2) - (c_1 b_1 + c_2 b_2) = \pm U_1 \frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}};$$

$$a_4 = (c_1 b_2 - c_2 b_1) - (d_1 a_2 - d_2 a_1) = - U_1 \frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}}.$$

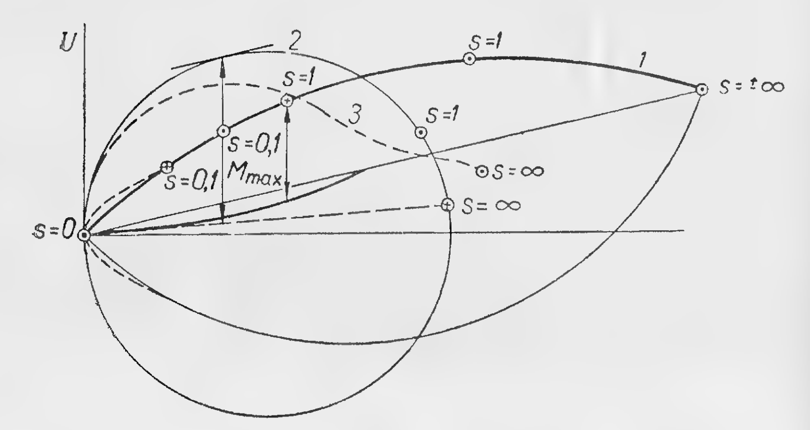



Рис. 231. Геометрическое место токов ротора:

*1* — массивного (на кривой *1* кружками с точкой указаны скольжения без учета изменения $\mu'$); *2* — без вытеснения тока; *3* — с глубоким пазом.

Для координат центра окружности и ее радиуса получим в данном случае:

$$\xi_0 = \pm \frac{U_1}{2} \frac{\frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}}}{\frac{r_2'}{\sqrt{I_2'}}(\pm x_1' - r_1')} = \pm \frac{U_1}{2} \frac{1}{\pm x_1' - r} :$$

$$\eta_0 = - \frac{U_1}{2} \frac{\frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}}}{\frac{r_2''}{\sqrt{I_2'}}(\pm x_1' - r_1')} = - \frac{U_1}{2} \frac{1}{\pm x_1' - r_1'};$$

$$R = \frac{U_1}{\sqrt{2}\,|(\pm x_1' - r_1')|}.$$

Из приведенного сравнения видно, что координаты центра окружности и ее радиус не зависят от тока $I_2'$.

Следовательно, геометрическое место тока $I_2''$ двигателя с массивным ферромагнитным ротором при принятых допущениях представляет собой части двух пересекающихся окружностей. Для двигательного режима окружность имеет координаты центра

$$\xi_0 = \frac{U_1}{2(x_1' - r_1')}; \quad \eta_0 = -\frac{U_1}{2(x_1' - r_1')}$$



и радиус

$$R = \frac{U_1}{\sqrt{2}(x_1 - r_1)}.$$

Для генераторного режима:

$$\xi_0 = \frac{U_1}{2(x_1 + r_1)}; \quad \eta_0 = \frac{U_1}{2(x_1 + r_1)}; \quad R = \frac{U_1}{\sqrt{2}(x_1 - r_1)}.$$

Геометрическое место токов нанесено на рис. 231 (кривая *1*). Следует отметить, что в области малых скольжений ($s \approx 0$) действительное изменение тока будет отличаться от приведенного (см. пунктирную кривую), что может быть получено в том случае, если не пренебрегать в уравнении (250) для $\mu'$ членом

$$\frac{k_2}{H^{1-\frac{1}{n}}} e^{-\alpha_2 H^m}.$$

Кривые момента и тока в функции скольжения приведены на рис. 232.

Приведенный метод расчета отличается от известных методов (221) тем, что:

а) теория массивного ротора и его параметры приведены к обычной эквивалентной схеме асинхронной машины;

б) учитывается изменение магнитной проницаемости ротора в функции тока и скольжения;

в) формулы для тока и момента приведены к наглядной и удобной для расчета форме.

На рис. 231 представлено геометрическое место тока асинхронного двигателя с массивным ротором (кривая *1*). На том же рисунке для сравнения приведены геометрические места нормального (кривая *2*) и глубокопазного (пунктирная кривая *3*) двигателей. Из сравнения видно, что максимальный момент двигателя с массивным гладким ротором составляет около 50—60% от максимального момента нормального двигателя.

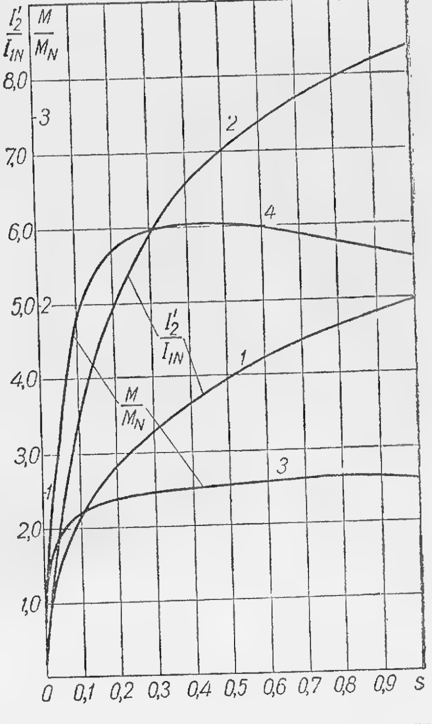



Рис. 232. Пусковые характеристики двигателя с массивным ротором.

Кривые *1* и *3* построены без учета изменения $\mu'$; *2* и *4* — с учетом.

Сравнение кривой *1* с геометрическим местом глубокопазного двигателя показывает, что свойства этих двигателей в общем близки друг к другу. Однако глубокопазный двигатель при малых мощностях дает более благоприятные рабочие характеристики из-за меньшей величины вторичного сопротивления.

Преимущества массивнороторного двигателя перед двигателем с клеткой получаются при больших скоростях вращения и высоких частотах питающего тока. Благодаря возможности получения больших окружных скоростей полезная мощность двигателя на единицу веса растет. Относительные параметры ротора, как это видно из выражения (261), с ростом частоты и мощности уменьшаются, что благоприятно сказывается на его характеристиках.

Данные выполненных асинхронных двигателей приведены в табл. 68

*Таблица 68*

**Данные выполненных асинхронных двигателей**

| № по пор. | $P$ (в *квт*) | $U$ (*в*) | $\eta$ | $\cos\varphi$ | $n$ (в об/мин) | $\frac{M_{max}}{M_N}$ | $\frac{I_{пуск}}{I_N}$ | $\frac{M_{пуск}}{M_N}$ | $D_j$ (в *мм*) | $D$ (в *мм*) | $\delta$ (в *мм*) | $l$ (в *мм*) | $Z_1$ | $Z_2$ | $b_{01}-b_1$ (в *мм*) | $h_{01}-h_1$ (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,6 | 220/380 | 0,740 | 0,770 | 1410 | 2,00 | 5,0 | 1,8 | 145 | 89 | 0,25 | 64 | 24 | 18 | 2,5—8,3 | 0,5—15,3 |
| 2 | 4,5 | 220/380 | 0,855 | 0,860 | 1440 | 2,00 | 6,0 | 1,4 | 245 | 152 | 0,40 | 90 | 36 | 26 | 2,8—9,1 | 0,75—24,75 |
| 3 | 10,0 | 220/380 | 0,875 | 0,880 | 1450 | 2,00 | 5,0 | 1,2 | 327 | 200 | 0,40 | 75 | 36 | 44 | 3,2—10,9 | 1,0—28,8 |
| 4 | 20,0 | 220/380 | 0,890 | 0,890 | 1450 | 2,10 | 5,0 | 1,1 | 368 | 229 | 0,50 | 100 | 36 | 44 | 3,2—12,75 | 1,0—30,8 |
| 5 | 40,0 | 220/380 | 0,905 | 0,900 | 1460 | 2,30 | 6,0 | 1,1 | 423 | 266 | 0,60 | 130 | 48 | 58 | 3,2—11,05 | 1,0—36,8 |
| 6 | 20,0 | 220/380 | 0,875 | 0,820 | 730 | 2,00 | 4,5 | 1,3 | 423 | 300 | 0,55 | 130 | 72 | 58 | 3,2—8,675 | 1,0—32,8 |
| 7 | 75,0 | 220/380 | 0,915 | 0,900 | 1460 | 2,10 | 5,5 | 1,0 | 493 | 315 | 1,00 | 160 | 60 | 50 | 3,5—11,3 | 1,0—43,0 |
| 8 | 850,0 | 6000/— | 0,936 | 0,830 | 493 | 2,10 | 4,15 | 0,870 | 1400 | 1100 | 1,80 | 590 | 108 | 132 | 16—16 | 0,6—80 |
| 9 | 1700,0 | 6000/— | 0,941 | 0,860 | 494 | 1,87 | 3,85 | 0,865 | 1700 | 1390 | 2,40 | 690 | 144 | 172 | 14,5—14,5 | 0,5—89,0 |
| 10 | 2000,0 | 6000/— | — | 0,820 | 1442 | 2,16 | 6,06 | 1,28 | 1160 | 740 | 3,00 | 790 | 72 | 62 | 19—19 | 0,5—97,1 |
| 11 | 2300,0 | 10 000/— | 0,935 | 0,730 | 248 | 2,21 | 4,4 | 0,853 | 2930 | 2570 | 3,00 | 690 | 216 | 247 | 19,5—19,5 | 0,5—99,5 |
| 12 | 10,0 | 220/380 | 0,835 | 0,850 | 1420 | — | — | — | 327 | 200 | 0,40 | 75 | 36 | 48 | 3,2—10,9 | 1,0—28,8 |
| 13 | 55,0 | 220/380 | 0,890 | 0,870 | 1440 | — | — | — | 423 | 265 | 0,60 | 180 | 48 | 60 | 3,2—11,05 | 1,0—36,8 |
| 14 | 125,0 | 220/380 | 0,920 | 0,880 | 997 | — | — | — | 590 | 410 | 0,75 | 290 | 72 | 90 | 4,8—8,7 | 1,0—41,7 |
| 15 | 250,0 | 380/— | 0,945 | 0,870 | 743 | 3,25 | — | — | 900 | 650 | 1,10 | 520 | 72 | 84 | 12,8—12,8 | 1,0—50,0 |
| 16 | 320,0 | —/6000 | 0,920 | 0,730 | 369 | 2,44 | — | — | 1490 | 1170 | 2,00 | 299 | 108 | 144 | 14,5—14,5 | 0,5—78,2 |
| 17 | 1250,0 | —/6000 | 0,943 | 0,900 | 749 | 2,00 | — | — | 1480 | 1060 | 1,50 | 445 | 108 | 90 | 14—14 | 1,1—85,3 |

*Продолжение табл. 68*

| № по пор. | Размер провода статора (в *мм*) | $\frac{s_{п1}}{a}$ | $\frac{b_{02}-b_2}{h_{02}-h_2}$ (в *мм*) | Размер к. з. кольца $a \times b$ (в *мм*) | $U_2$ (в *в*) | $I_2$ (в *а*) | Размер провода ротора (в *мм*) | $\frac{s_{п2}}{a}$ | Соед. ротора |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ⌀ 0,57 | $\frac{118}{1}$ | $\frac{1-5,5}{0,5-13}$ | 9 × 12 | — | — | — | — | — |
| 2 | ⌀ (1,12 + 1,16) | $\frac{32}{1}$ | $\frac{1,8-7,3}{0,75-18,25}$ | 10 × 27 | — | — | — | — | — |
| 3 | 2 [⌀ 1,35] | $\frac{28}{1}$ | $\frac{1,5-3,5}{0,5-30,5}$ | 15 × 34 | — | — | — | — | — |
| 4 | 2 [⌀ 1,4] | $\frac{34}{2}$ | $\frac{1,5-3,6}{0,8-35,8}$ | 16 × 39 | — | — | — | — | — |
| 5 | 4 [⌀ 1,5] | $\frac{16}{2}$ | $\frac{1,5-4,0}{4,0-39}$ | 18,5 × 40 | — | — | — | — | — |
| 6 | 2 [⌀ 1,56] | $\frac{22}{2}$ | $\frac{1,5-4,5}{0,8-38,8}$ | 13 × 49 | — | — | — | — | — |
| 7 | 3 [⌀ 1,68] | $\frac{20}{4}$ | $\frac{1,5-5,5}{2-42}$ | 22 × 50 | — | — | — | — | — |
| 8 | 2 [⌀ 4,4 × 3,35] | $\frac{14}{1}$ | $\frac{3-16,5;\ 3\times 13,5}{3-9-42}$ | 30 × 20<br>30 × 20 | — | — | — | — | — |

| № по пор. | Размер провода статора (в *мм*) | $\frac{s_{n_1}}{a}$ | $\frac{b_{02}-b_3}{h_{02}-h_3}$ (в *мм*) | Размер к. з. кольца $a \times b$ (в *мм*) | $U_2$ (в *в*) | $I_2$ (в *а*) | Размер провода ротора (в *мм*) | $\frac{s_{n_2}}{a}$ | Соед. ротора |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 6 [3,28×2,44] | $\frac{8}{1}$ | $\frac{3-14;\ 3-14}{2-7-37}$ | 20 × 25<br>25 × 35 | — | — | — | — | — |
| 10 | 4[5,5×2,44] | $\frac{12}{—}$ | $\frac{6,0-20,5}{12-32}$ | — | — | — | — | — | — |
| 11 | 6 [4,1×2,1] | $\frac{8}{1}$ | $\frac{2-16;\ 3-16}{2,5-7-41}$ | 20 × 30<br>20 × 40 | — | — | — | — | — |
| 12 | 2 [∅ 1,5] | $\frac{24}{1}$ | $\frac{3,4-3,7}{0,5-35,5}$ | — | 207 | 32 | 2,1 × 2,63 | $\frac{10}{1}$ | Y |
| 13 | 3 [∅ 1,5] | $\frac{24}{4}$ | $\frac{4,0-4,6}{1,0-37,0}$ | — | 480 | 72 | 2 [2,44 × 2,1] | $\frac{6}{1}$ | Y |
| 14 | 2 [2,44 — 3,53] | $\frac{8}{3}$ | $\frac{1,5-4,9}{-43,3}$ | — | 342 | 225 | 2,44 × 18 | $\frac{2}{1}$ | Y |
| 15 | 4 [4,7 — 2,83] | $\frac{6}{2}$ | $\frac{1,5-10,7}{0,7-51,5}$ | — | — | — | 3,28 × 19,5 | $\frac{4}{1}$ | Y |
| 16 | 1,56×6,9 | $\frac{28}{1}$ | $\frac{1,5-9,1}{0,8-41}$ | — | 576 | 344 | 5,5 × 14,5 | $\frac{2}{1}$ | Y |
| 17 | 2 [6,9×2,1] | $\frac{10}{1}$ | $\frac{1,5-10,4}{1,2-54}$ | — | — | — | 2 [3,8 × 2,2] | $\frac{2}{1}$ | Y |



# ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

## *Пример 1*

### Расчет двигателя с фазным ротором

I. Проектное задание (§ 11-2)

1. Мощность 1000 *квт*.
2. Назначение двигателя — прокатный.
3. Скорость вращения $n_1 = 187{,}5$ об/мин, скольжение $s_N = 2\%$.
4. Напряжение 6000 *в*, частота 50 *гц*.
5. Конструктивный тип — защищенный (с фазным ротором).
6. Коэффициент мощности 0,75.
7. Коэффициент полезного действия 92%.
8. Кратность максимального момента 2.
9. Кратность пускового момента } не задаются, так как пуск осуществляется при включении сопротивления в ротор.
10. Кратность пускового тока }
11. График и характер нагрузки, пределы регулирования скорости и т. д.— задана среднеквадратичная мощность, регулирование не предусматривается.
12. Сопряжение фаз $Y$; при этом $U_{\text{ф}N} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3470$ *в*.

II. Оценка заданного $\cos\varphi$, к. п. д. и распределение потерь

1. Относительные электрические потери

$$\frac{\Sigma p_э}{P_2} \approx k\left(\frac{2p}{P_2}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{2 \cdot 16}{1\,000\,000}\right)^{\frac{1}{4}} = 0{,}0755,$$

где $k \approx 1$, если $P_2$ выражено в *вт*;

$$p = \frac{f_1}{n_1} = \frac{50 \cdot 60}{187{,}5} = 16.$$

2. Механические и добавочные потери

$$\frac{p_m + p_{доб}}{P_2} \approx 0{,}0065 \ (0{,}65\%).$$

3. $\eta = 1 - 0{,}0755 - 0{,}0065 = 0{,}918$ (т. е. близок к заданному).
4. Распределение потерь (ориентировочно):

а) постоянные потери составляют 40% от $\Sigma p$;
б) переменные потери составляют 60% от $\Sigma p$.

Чтобы получить в роторе запас в тепловом отношении, распределяем потери в меди между статором и ротором, как 3 : 2, т. е. потери в меди статора составляют 40% от $\Sigma p$, и потери в меди ротора 25% от $\Sigma p$; при этом номинальное скольжение $s_N \approx 0{,}0755 \cdot 0{,}25 = 0{,}019$ (задано $s_N \approx 2\%$).

Для машин этого типа пониженный коэффициент мощности ($\cos\varphi = 0{,}75$) объясняется низкой скоростью двигателя и увеличенным воздушным зазором.

### III. Выбор основных размеров (§ 11-4)

1. Полюсное деление

$$\tau = C_s \left(\frac{P\beta}{2p\sqrt{2}f\lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad \text{где } P = \frac{P_2}{\eta\cos\varphi} = 1450 \text{ ква.}$$

Выбираем по рис. 205, 7, 8

$$\beta = 0{,}77; \; C_s = 4; \; \lambda_1 = 0{,}25$$

и получаем

$$\tau = 4\left(\frac{1\,450\,000 \cdot 0{,}77}{32\sqrt{2}\cdot 50 \cdot 0{,}25}\right)^{\frac{1}{4}} \approx 26{,}7 \text{ см.}$$

Принимаем $\tau = 26{,}2$ *см*, ориентируясь на одну из выполненных машин.

2. Диаметр расточки статора

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{32 \cdot 26{,}2}{\pi} = 267 \text{ см.}$$

3. Внешний диаметр (ориентировочно)

$$D_{j1} \approx D\left[1 + \frac{(1 \div 1{,}2)\pi}{2p}\right] = 267\left[1 + \frac{(1 \div 1{,}2)\pi}{32}\right] = (294 \div 297) \text{ см.}$$

Принимаем $D_{j1} = 290$ *см* (приложение I).

4. Расчетная длина машины

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{26{,}2}{0{,}77} = 34 \text{ см.}$$

Проверяем по формуле $l_i = \frac{C_A P}{D^2 n}$, где $C_A = 4{,}6$ *см³/дж* (рис. 206):

$$l_i = \frac{4{,}6 \cdot 1450 \cdot 10^3 \cdot 60}{267^2 \cdot 187{,}5} = 30 \text{ см.}$$

Принимаем $l_i = 34$ *см*.

### IV. Вентиляционные каналы в статоре и роторе и длина чистого железа (§ 11-5)

1. Полная длина якоря (статора)

$$l = l_i + 0{,}5 n_s b_s; \quad n_s = \frac{l_i - l'}{l' - 0{,}5\, b_s}.$$

Выбираем ширину пакета $l'$ в пределах $4 \div 6$ *см*; при этом число каналов

$$n_s = 6; \; b_s = 1 \text{ см.}$$

Тогда

$$l = 34 + 0{,}5 \cdot 6 \cdot 1 = 37 \text{ см.}$$

Ширина пакета

$$l' = \frac{l_i - 0{,}5 n_s b_s}{n_s + 1} = \frac{34 - 0{,}5 \cdot 6 \cdot 1}{6 + 1} = 4{,}3 \text{ см.}$$

2. Длина чистого железа

$$l_{Fe} = (l - n_s b_s)\, k_п = (37 - 6 \cdot 1)\, 0{,}92 = 28{,}5 \text{ см,}$$

где $k_п$ — коэффициент заполнения пакета, равный приблизительно 0,92.

Коэффициент заполнения длины $\varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i} = \frac{28{,}5}{34} = 0{,}84.$



### V. Воздушный зазор (§ 11-6)

Минимальная допустимая величина воздушного зазора (по механическим условиям)

$$\delta_{min} = 0{,}1 + 0{,}02\sqrt{Dl} = 0{,}1 + 0{,}02\sqrt{267 \cdot 37} \approx 2 \text{ мм.}$$

Берем $\delta = 2{,}2$ *мм*, т. е. несколько повышенную величину, учитывая назначение двигателя (прокатный).

### VI. Обмотка и пазы статора (§ 11-7)

1. Выбираем двухслойную обмотку с сокращенным шагом.
2. Для выбора $q_1$ составляем таблицу величин пазового деления $t_1$ в зависимости от значения $q_1$

| $q_1$ | $Z_1$ | $t_1$ |
|---|---|---|
| 2 | 192 | 4,37 |
| 3 | 288 | 2,92 |
| 4 | 384 | 2,19 |
| 5 | 480 | 1,75 |

Учитывая изложенное в § 11-7, берем $q_1 = 3$.

3. Число пазов и их шаг

$$Z_1 = 2pmq_1 = 32 \cdot 3 \cdot 3 = 288;$$

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 267}{288} = 2{,}92 \text{ см.}$$

4. Определим число витков обмотки статора.

Индукция в воздушном зазоре (ориентировочно)

$$B_\delta = \zeta\varphi_{Fe}B_z = 0{,}55 \cdot 0{,}84 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-4} = 0{,}74 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2.$$

Принимаем среднюю индукцию в зубцах $B_z = 1{,}6 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*; $\varphi_{Fe} = 0{,}84$; $\frac{b_z}{t_1} = \zeta = 0{,}55$.

Магнитный поток на полюс

$$\Phi = \alpha_i l_i \tau B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 34 \cdot 26{,}2 \cdot 0{,}74 \cdot 10^{-4} = 420 \cdot 10^{-4} \text{ вб,}$$

где $\alpha_i \approx \frac{2}{\pi}$ (если принять синусоидальную форму кривой поля).

Число витков в фазе

$$w_1 = \frac{E_{10}}{\pi\sqrt{2}fk_{w1}\Phi} = \frac{3360}{222 \cdot 0{,}93 \cdot 420 \cdot 10^{-4}} = 388,$$

где ориентировочно

$$E_{10} \approx U_1 - I_{0r}x_1 \approx 0{,}97\, U_1 = 0{,}97 \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3360 \text{ в};$$

$k_{w1} \approx 0{,}93$.

Берем $w_1 = 384$, чтобы получить целое $s_{п1}$, так как $w_1 = s_{п1} pq_1$.

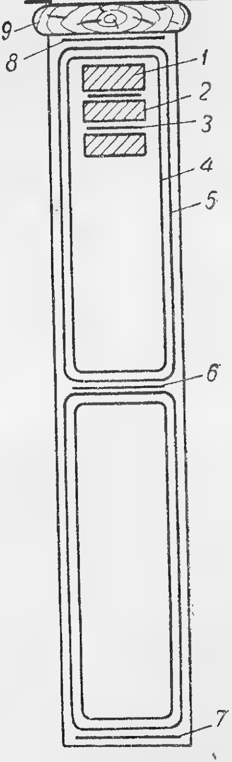



Рис. 233. Паз статора.

5. Число последовательных витков в пазу

$$s_{п_1} = \frac{w_1}{pq_1} = \frac{384}{16 \cdot 3} = 8.$$

6. Ток статора

$$I_1 = \frac{P_2}{mU_1 \cos\varphi\eta} = \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 6000 \cdot 0,75 \cdot 0,92} = 140\ a.$$

7. Линейная нагрузка

$$A_1 = \frac{2m_1 w_1 I_1}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 384 \cdot 140}{\pi \cdot 267} = 384\ \boldsymbol{a/см}.$$

8. Принимаем число параллельных ветвей $a_1 = 2$.

9. Сечение параллельной ветви и фазового провода, принимая $s_1 = 4\ a/мм^2$

$$q'_{Ф_1} = \frac{I_1}{a_1 s_1} = \frac{140}{2 \cdot 4} = 17,5\ мм^2;\ q_{Ф_1} = a_1 q'_{Ф_1} = 2 \cdot 17,5 = 35\ мм^2.$$

По стандарту выбираем провод прямоугольного сечения марки ПБД $h \times b = 6,4 \times 2,83 \approx 17,6\ мм^2$ (с учетом закруглений).

Точное значение плотности тока

$$s_1 = 4 \cdot \frac{17,5}{17,6} = 3,98\ a/мм^2.$$

10. Размеры паза (рис. 233)

| Наименование | Размер паза по ширине (в *мм*) | Размер паза по высоте (в *мм*) |
|---|---|---|
| *1*— проводник марки ПБД 6,4×2,83 . . . . | 6,4 | 2,83×16=45,28 |
| *2*— изоляция проводника . . . . . . . . . | 0,33 | 0,33×16 = 5,28 |
| *3*— витковая изоляция: миканит 0,5 (прокладки между проводниками) . . . . . . . . | — | 0,5×14 = 7,0 |
| *4*— изоляция секции: микалента ЛМЧ-1 0,13××20 *мм* 9 слоев вполнахлеста . . . . . | 0,13×18×2=4,68 | 0,13×18×4=9,36 |
| *5*— изоляция секции; лента киперная 0,3××20 *мм*, 1 слой впритык . . . . . . . . | 0,3×2=0,6 | 0,3×4 = 1,2 |
| *6*— прокладка между секциями: электрокартон ЭВ . . . . . . . . . . . . . . . . | — | 1,5 |
| *7*— прокладка на дно паза: электрокартон ЭВ | — | 0,5 |
| *8*— прокладка под клин: электрокартон ЭВ | — | 1,0 |
| *9*— клин буковый пропитанный . . . . . . . | — | 3,5 |
| *10*— надклиновая часть . . . . . . . . . . . | — | 0,5 |
| *11*— пропитка секции (лак) . . . . . . . . . | 0,1×2 = 0,2 | 0,1×4 = 0,4 |
| *12*— зазор и допуск . . . . . . . . . . . . | 0,79 | 0,54 |
| Всего . . . . . | 13,0 | 76,0 |

11. Обмоточные коэффициенты. Выбирая сокращение шага на 1 паз $\varepsilon = 1$, получаем

$$\tau_п = \frac{Z}{2p} = \frac{288}{32} = 9;$$

$$y_п = \tau_п - \varepsilon = 9 - 1 = 8;\ y = \frac{y_п}{\tau_п} = \frac{8}{9} = 0,89;$$

$$k_{y1} = \sin\frac{\pi}{2} y = \sin\frac{\pi}{2} 0,89 = 0,985;$$

$$k_{р1} = \frac{\sin\frac{\pi}{2m}}{q_1 \sin\frac{\pi}{2mq}} = \frac{\sin\frac{\pi}{2 \cdot 3}}{3 \sin\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 3}} = 0,96;$$

$$k_{w1} = k_y k_р = 0,985 \cdot 0,96 = 0,945.$$



12. Точное значение потока и индукции основной волны в зазоре при $w_1 = 384$ витка

$$\Phi_1 = 0,0420\frac{388}{384} = 0,0425\ вб;\ B_{\delta_1} = \frac{\pi}{2}\frac{\Phi_1}{\tau l_i} = \frac{1,57 \cdot 0,0425}{26,2 \cdot 34} = 0,75 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2.$$

13. Номинальное значение потока

$$\Phi_N = \Phi_1\frac{U_N}{E_{01}} = 0,0425\frac{1}{0,97} = \mathbf{0,0438\ вб.}$$

14. Номинальное значение индукции $\left(\text{если принять } \alpha \approx \frac{2}{\pi}\right)$

$$B_{\delta N} = 0,75 \cdot 10^{-4}\frac{1}{0,97} = 0,772 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2.$$

## VII. Внешний диаметр статора (§ 11-7)

1. Высота ярма статора, принимая $B_{j_1} = 1,1 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2$,

$$h_{j_1} = \frac{\Phi_1}{2l_{Fe}B_{j_1}} = \frac{425 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 28,5 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4}} = 6,77\ см \approx 6,8\ см.$$

2. Внешний диаметр статора

$$D_j = D + 2h_{п_1} + 2h_{j1} = 267 + 2 \cdot 7,6 + 2 \cdot 6,8 = 295,8\ см.$$

Округляем до $D_j = 296$ **см** (отступаем от серийных габаритов). При этом

$$h_{j_1} = 6,9\ см;\quad B_j = 1,07 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2.$$

## VIII. Обмотка и пазы ротора (§ 11-8)

1. Диаметр ротора

$$D_r = D - 2\delta = 267 - 2 \cdot 0,22 = 266,56\ см.$$

2. Число пазов, приняв $q_2 = 2$,

$$Z_2 = 2pm_2q_2 = 32 \cdot 3 \cdot 2 = 192.$$

3. Пазовое деление ротора

$$t_2 = \frac{\pi D_r}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 266,56}{192} = \mathbf{4,36\ см.}$$

Необходимо заметить, что величина $q_2$ (точнее $t_2$) существенным образом влияет на пульсационные потери в роторе. Так, например, при $q_2 = 4,5$ эти потери составляют приблизительно 25 *квт*, тогда как при $q = 2$ они равны приблизительно 2 *квт* (см. расчет потерь).

4. Число витков ротора

$$w_2 = \frac{Z_2 s_{п_2}}{2m_2 a_2},\quad s_{п2} = \frac{2m_1 w_1}{Z_2}\frac{U_2}{U_1} = \frac{6 \cdot 384}{192} \cdot \frac{500}{3460} = 1,73 \approx 2.$$

По табл. 64 выбираем $U_2$ в пределах $500 \div 1000\ в$; принимаем

$$s_{п_2} = 2,\quad w_2 = \frac{192 \cdot 2}{6 \cdot 1} = 64;\quad a_2 = 1.$$

5. Обмоточные коэффициенты ротора

$$k_{w2} = k_{y_2}k_{р_2}.$$

Берем диаметральный шаг $k_{y_2} = 1$, тогда

$$k_{р_2} = \frac{\sin\frac{\pi}{2m}}{q_2 \sin\frac{\pi}{2mq_2}} = \frac{\sin\frac{\pi}{2 \cdot 3}}{2 \sin\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 2}} = 0,966,$$

$$k_{w2} = k_{y_2}k_{р_2} = 1 \cdot 0,966 = 0,966.$$

6. Электродвижущая сила на фазу

$$E_{20} = E_{10}\frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_{w1}} = 3360\,\frac{64\cdot 0{,}966}{384\cdot 0{,}945} = 573\ \textit{в}.$$

7. Фазный ток при нагрузке

$$I_2 = \frac{P_2(1+0{,}02)}{m_2 E_{20}(1-s_N)} = \frac{1\,000\,000\,(1+0{,}02)}{3\cdot 573\,(1-0{,}02)} = 600\ \textit{а}.$$

Принимаем номинальное скольжение

$$s_N = 2{,}0\%.$$

8. Задавшись $s_2 = 4{,}3$ *а/мм²*, определяем общее сечение фазового провода

$$q_{ф2} = \frac{I_2}{s_2} = \frac{600}{4{,}3} = 140\ \textit{мм}^2.$$

Проверяем выбранное сечение по величине заданного скольжения

$$q_{ф2} = \rho_{75}\,\frac{2(l+1{,}8\tau)\,w_2}{r_2} = \frac{2{,}17\cdot 10^{-6}\cdot 2\,(37+1{,}8\cdot 26{,}2)\cdot 64}{0{,}0192} = 1{,}22\ \textit{см}^2,$$

где

$$r_2 = \frac{E_{20}s_N}{I_{2N}} = \frac{573\cdot 0{,}02}{600} = 0{,}0192\ \textit{ом}.$$

По стандарту выбираем

$$q_{ф2} = 2bh = 2\,(16{,}8\cdot 3{,}8) = 127{,}8\ \textit{мм}^2.$$

Точное значение плотности тока в роторе

$$s = \frac{600}{127{,}8} = 4{,}7\ \textit{а/мм}^2.$$

9. Размеры паза ротора (рис. 234):

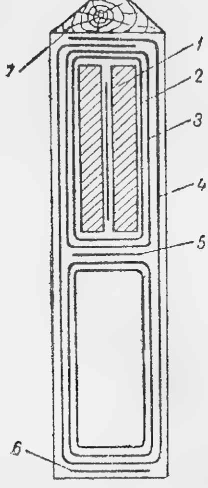



Рис. 234.
Паз ротора.

| | По высоте | По ширине |
|---|---|---|
| 1 — проводник . . . . . . | 16,8 × 2 = 33,6 | 3,8 × 2 = 7,6 |
| 2 — микафолий . . . . . | 0,7 × 4 = 2,8 | 0,7 × 2 = 1,4 |
| 3 — телефонная бумага . . | 0,1 × 4 = 0,4 | 0,1 × 2 = 0,2 |
| 4 — электрокартон . . . . | 0,3 × 3 = 0,9 | 0,3 × 2 = 0,6 |
| 5 — электрокартон . . . . | 0,5 | — |
| 6 — электрокартон . . . . | 0,3 | — |
| 7 — клин . . . . . . . . | 3 | — |
| 8 — надклиновая часть . . | 0,6 | — |
| 9 — лак . . . . . . . . | 0,2 | 0,1 |
| 10 — зазор . . . . . . . . | 1 | — |
| Итого . . | $h_{п2} = 43{,}3$; | $b_{п2} = 9{,}9 \approx 10$ *мм*. |

## IX. Внутренний диаметр пакетов ротора (§ 11-9)

1. Задаемся $B_{j2} = 1{,}1\cdot 10^{-4}$ *вб/см²* и получаем высоту ярма ротора

$$h_{j2} = \frac{\Phi}{2l_{Fe}B_{j2}} = \frac{425\cdot 10^{-4}}{2\cdot 28{,}5\cdot 1{,}1\cdot 10^{-4}} = 6{,}8\ \textit{см}.$$

2. Внутренний диаметр ротора

$$D_{j2} = D - 2\delta - 2h_{п2} - 2h_{j2} = 267 - 2\cdot 0{,}22 - 2\cdot 4\cdot 33 - 2\cdot 6{,}8 = 244{,}3\ \textit{см}.$$

Принимаем $D_{j2} = 244$ *см*; при этом точные значения $h_{j2} = 6{,}65$ *см* и $B_{j2} = 1{,}125\cdot 10^{-4}$ *вб/см²*.



## X. Расчет намагничивающего тока (§ 11-10)

1. Длины магнитных путей:

в ярме статора

$$L_{j1} = \frac{\pi(D_{j1} - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(296 - 6{,}9)}{32} = 28{,}4\ \textit{см};$$

в зубцах статора

$$L_{z1} = 2h_{п1} = 2\cdot 7{,}6 = 15{,}2\ \textit{см};$$

в ярме ротора

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_r - 2h_{п2} - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(266{,}56 - 2\cdot 4{,}33 - 6{,}65)}{32} = 24{,}6\ \textit{см};$$

в зубцах ротора

$$L_{z2} = 2h_{п2} = 2\cdot 4{,}33 = 8{,}66\ \textit{см}.$$

2. Эффективный зазор

$$\delta' = k_C\delta;\quad k_C = k_{C_1}k_{C_2}.$$

Коэффициент Картера для статора

$$k_{C_1} = \frac{t_1}{t_1 - b_1},\quad b_1 = b_0\frac{b_0}{5\delta + b_0} = 1{,}3\,\frac{1{,}3}{5\cdot 0{,}22 + 1{,}3} = 0{,}705\ \textit{см}$$

($b_1$ — расчетное пазовое открытие);

$$k_{C_1} = \frac{2{,}92}{2{,}92 - 0{,}705} = 1{,}325.$$

Коэффициент Картера для ротора

$$k_{C_2} = \frac{t_2}{t_2 - b_2};\quad b_2 = b_{02}\frac{b_0}{5\delta + b_{02}} = 0{,}3\,\frac{0{,}3}{5\cdot 0{,}22 + 0{,}3} = 0{,}064\ \textit{см};$$

$$k_{C_2} = \frac{4{,}36}{4{,}36 - 0{,}064} = 1{,}015.$$

Приведенный коэффициент Картера

$$k_C = k_{C_1}\cdot k_{C_2} = 1{,}325\cdot 1{,}015 = 1{,}345.$$

Эффективный зазор

$$\delta' = 1{,}345\cdot 0{,}22 = 0{,}296\ \textit{см}.$$

3. Индукции и удельные ампер-витки (см. приложение II):

в ярме статора

$$B_{j_1} = 1{,}07\cdot 10^{-4};\quad aw_{j_1} = 3{,}11\ \textit{а/см}$$

(марка стали Э12, толщина $\Delta = 0{,}5$ *мм*);

в зубцах статора на $\frac{1}{3}$ высоты $\left(x = \frac{1}{3}\right)$

$$t_{1x} = \frac{\pi\left(D + \frac{2}{3}h_{п1}\right)}{Z_1} = \frac{\pi\left(267 + \frac{2}{3}7{,}6\right)}{288} = 2{,}96\ \textit{см};$$

$$b_{z1x} = t_{1x} - b_{п1} = 2{,}96 - 1{,}3 = 1{,}66\ \textit{см};$$

$$B_{z1x} = \frac{l_i t_1}{l_{Fe}b_{z1x}}B_\delta = \frac{34\cdot 2{,}92}{28{,}5\cdot 1{,}66}\,0{,}75\cdot 10^{-4} = 1{,}57\cdot 10^{-4}\ \textit{вб/см}^2;$$

$$aw_{z1x} = 15{,}9\ \textit{а/см};$$

в ярме ротора

$$B_{j_2} = 1{,}125\ \textit{вб/см}^2;\quad aw_{j_2} = 3{,}48\ \textit{а/см}.$$

в зубцах ротора в трех сечениях

$$t_{21}=t_2=4{,}36;\quad t_{22}=\frac{\pi(D_r-h_{п2})}{Z_2}=\frac{\pi(266{,}56-4{,}33)}{192}=4{,}3;$$

$$t_{23}=\frac{\pi(D_r-2h_{п2})}{Z_2}=\frac{\pi(266{,}56-2\cdot4{,}33)}{192}=4{,}22;$$

$$b_{21}=t_{21}-b_{п2}=4{,}36-1=3{,}36;\quad b_{22}=3{,}3;\quad b_{23}=3{,}22;$$

$$B_{21}=\frac{l_it_{21}}{l_{Fe}b_{221}}B_\delta=\frac{34\cdot4{,}36}{28{,}5\cdot3{,}36}0{,}75\cdot10^{-4}=1{,}16\cdot10^{-4};\quad aw_{21}=5{,}89;$$

$$B_{22}=B_{21}\frac{b_{21}}{b_{22}}=1{,}16\cdot10^{-4}\frac{3{,}36}{3{,}3}=1{,}18\cdot10^{-4};\quad aw_{22}=6{,}14;$$

$$B_{23}=B_{21}\frac{b_{21}}{b_{23}}=1{,}16\cdot10^{-4}\frac{3{,}36}{3{,}22}=1{,}2\cdot10^{-4};\quad aw_{23}=6{,}4;$$

$$aw_{22}=\frac{1}{6}(5{,}89+4\cdot6{,}14+6{,}4)=6{,}14.$$

4. М. д. с. на ярмо статора

$$2F_{j_1}=aw_{j_1}L_{j_1}=3{,}11\cdot28{,}4=88{,}3;$$

на зубцы статора

$$2F_{21}=aw_{2x}L_{21}=15{,}9\cdot15{,}2=242;$$

на ярмо ротора

$$2F_{j_2}=aw_{j_2}L_{j_2}=3{,}48\cdot24{,}6=85{,}5;$$

на зубцы ротора

$$2F_{22}=aw_{22}L_{22}=6{,}14\cdot8{,}66=53{,}2;$$

на воздушный зазор

$$2F_\delta=\frac{2\delta'}{\mu_0}B_\delta=\frac{2\cdot0{,}296}{0{,}4\pi\cdot10^{-8}}0{,}75\cdot10^{-4}=3560.$$

5. $2F=88{,}3+242+85{,}5+53{,}2+3560=4029\ a.$

6. Коэффициент насыщения

$$k_н\approx\frac{2F}{2F_\delta}=\frac{4029}{3560}=1{,}135.$$

По рис. 17 при $k_н=1{,}135$ $\alpha_i=0{,}66$.

7. Индукция в зазоре с учетом уплощения

$$B_\delta=B_{\delta_1}\frac{2}{\pi\alpha_i}=0{,}75\cdot10^{-4}\frac{2}{\pi\cdot0{,}66}=0{,}724\cdot10^{-4}\ вб/см^2.$$

$$2F_\delta=1{,}6\cdot10^8\cdot0{,}296\cdot0{,}724\cdot10^{-4}=3425\ a;$$

$$2F=88{,}3+242+88{,}5+53{,}2+3425=3894\ a;$$

$$k_н=\frac{2F}{2F_\delta}=\frac{3894}{3425}=1{,}14.$$

При $k_н=1{,}14$ $\alpha_i\approx0{,}66$, т. е.

$$B_\delta=0{,}724\cdot10^{-4}\ вб/см^2;\ 2F_\delta=3425\ a.$$

8. М. д. с. на пару полюсов

$$2F=3894\ a.$$

9. Намагничивающий ток

$$I_{0р}=\frac{p2F}{2{,}7w_1k_{w1}}=\frac{16\cdot3894}{2{,}7\cdot384\cdot0{,}945}=63{,}6\ a.$$

10. Ток холостого хода

$$I_0\approx I_{0р}=63{,}6\ a\ \text{или}\ I_{0р}=\frac{63{,}6}{140}=0{,}455.$$



## XI Расчет параметров обмоток и круговая диаграмма (§ 11-11)

1. Длина полувитка статора

$$\frac{1}{2}l_{w1}=l+1{,}6\tau'y+2U_л+\pi\left(r+\frac{h_п}{2}\right),$$

где

$$\tau'=\frac{\pi(D+h_{п1})}{2p}=\frac{\pi(267+7{,}6)}{32}=26{,}9\ см;$$

$r$ — радиус закругления головки, равный приблизительно 0,5 *см*;

$$\frac{1}{2}l_{w1}=37+1{,}6\cdot26{,}9\cdot0{,}89+2\cdot6+\pi\left(0{,}5+\frac{7{,}6}{2}\right)=100{,}9\ см.$$

$$l_{л_1}=100{,}9-37=63{,}9\ см.$$

2. Длина полувитка ротора

$$\frac{1}{2}l_{w2}=l+1{,}6\tau_2'y_2+2U_{л2}+2h_{п2}=l+l_{л2},$$

где

$$U_{л2}=U_{л1}\frac{w_2k_{w2}}{w_1k_{w1}}=6\ \frac{64\cdot0{,}966}{384\cdot0{,}945}=1{,}02\ кв;$$

$$\tau_2'=\frac{\pi(D_r-h_{п2})}{2p}=\frac{\pi(266{,}56-4{,}33)}{32}=25{,}7\ см;$$

$$\frac{1}{2}l_{w2}=37+1{,}6\cdot25{,}7\cdot1+2\cdot1{,}02+2\cdot4{,}33=88{,}7\ см;$$

$$l_{л2}=88{,}7-37=51{,}7\ см.$$

3. Омическое сопротивление статора при 75° С

$$r_{1\,75}=\rho_{75}\frac{w_1l_{w1}}{q_{ф1}}=1{,}24\cdot1{,}75\cdot10^{-6}\frac{384\cdot202}{0{,}352}=0{,}48\ ом;$$

$$r_1=\frac{r_{1\,75}I_N}{U_N}=\frac{0{,}48\cdot140}{3470}=0{,}0194.$$

4. Омическое сопротивление ротора при 75° С

$$r_{2\,75}=\rho_{75}\frac{w_2l_{w2}}{q_{ф2}}=2{,}17\cdot10^{-6}\frac{64\cdot177{,}4}{1{,}278}=0{,}0194\ ом;$$

$$r_{2\,75}'=r_{2\,75}k=0{,}0194\cdot34{,}5=0{,}67\ ом,$$

где $k$ — коэффициент приведения вторичных параметров к первичным,

$$k=\frac{m_1(w_1k_{w1})^2}{m_2(w_2k_{w2})^2}=\frac{3(384\cdot0{,}945)^2}{3(64\cdot0{,}966)^2}=34{,}5;$$

$$r_2'=\frac{r_{2\,75}'I_N}{U_N}=\frac{0{,}67\cdot140}{3470}=0{,}027.$$

5. Коэффициент увеличения сопротивления статорной обмотки

$$k_r\approx1+\frac{m^2-1}{9}\xi^4=1+\frac{16^2-1}{9}\cdot14{,}4\cdot10^{-4}=1{,}04,$$

где $m$ — число проводов по высоте паза;

$$\xi=\alpha h=0{,}69\cdot0{,}283=0{,}195;$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{b_{Cu\ п}\mu_0\omega}{b_п2\rho}}=\sqrt{\left(\frac{f}{50}\right)\frac{b_{Cuл}}{b_п}}=\sqrt{\frac{6{,}4}{13}}=0{,}69.$$

6. Активное сопротивление статора

$$r_1 = 1{,}04 \cdot 0{,}48 = 0{,}5\ \textit{ом}.$$

7. Реактивность рассеяния статора

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w_1^2}{pq_1} l_i [\lambda_{\text{п}_1} + \lambda_{\text{л}_1} + \lambda_{\delta_1}].$$

Пазовая проводимость (рис. 233 и 22)

$$\lambda_{\text{п}_1} = \frac{3y+1}{4}\left(\frac{h_1}{3b_{\text{п}}} + \frac{h_{\text{к}}}{b_{\text{п}}}\right) = \frac{3 \cdot 0{,}89 + 1}{4}\left(\frac{7{,}05}{3 \cdot 1{,}3} + \frac{0{,}35}{1{,}3}\right) = 1{,}9.$$

Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\delta_1} = \frac{m_1 q_1}{\pi^2} \frac{\tau}{\delta'} k_{w1}^2 \sigma_{\delta_1} = \frac{3 \cdot 3}{\pi^2} \cdot \frac{26{,}2}{0{,}296} 0{,}0103 = 0{,}833.$$

Произведение коэффициента дифференциального рассеяния $\sigma_{\delta 1}$ на $k_{w1}^2$ по табл. 4 равно 0,0103.

Проводимость рассеяния лобовых частей (см. гл. 4)

$$\lambda_{\text{л}_1} = k_{\text{л}} \frac{\tau}{l_i} q_1 \frac{3y-1}{2} = 0{,}57\ \ \frac{26{,}2}{34}\, 3\, \frac{3 \cdot 0{,}89 - 1}{2} = 1{,}1,$$

где $k_{\text{л}} = 0{,}57$ (для корзиночной обмотки).

Получаем

$$x_1 = 4\pi \cdot 50 \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \frac{384^2}{16 \cdot 3} 34\,(1{,}9 + 1{,}1 + 0{,}833) = 3{,}15\ \textit{ом}$$

или в долях единицы

$$x_1 = 3{,}15 \frac{\sqrt{3} \cdot 140}{6000} = 0{,}127.$$

8. Реактивность рассеяния ротора.

Пазовая проводимость при $y = 1$ (рис. 234)

$$\lambda_{\text{п}_2} = \frac{1}{3}\frac{h_1}{b_{\text{п}_2}} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{h_0}{b_0} = \frac{1}{3}\frac{3{,}85}{1} + \frac{0{,}3}{0{,}65} + \frac{0{,}06}{0{,}3} = 1{,}94.$$

Проводимость рассеяния лобовой части

$$\lambda_{\text{л}_2} = k_{\text{л}2} \frac{\tau}{l_i} q_2 \frac{3y_2 - 1}{2} = 0{,}57\ \ \frac{26{,}2}{34} 2 = 0{,}88; \quad (y_2 = 1).$$

Дифференциальная проводимость ротора

$$\lambda_{\delta_2} = \lambda_{\delta_1} \frac{m_2}{m_1} \frac{q_2}{q_1} \left(\frac{k_{w2}}{k_{w1}}\right)^2 \frac{\sigma_{\delta_2}}{\sigma_{\delta_1}} = 0{,}833\ \ \frac{2}{3}\, \frac{0{,}0265}{0{,}0103} = 1{,}43,$$

где $\sigma_{\delta_2} k_{w2}^2 = 0{,}0265$ (табл. 4).

Реактивность рассеяния ротора (см. уравнение для $x_1$):

$$x_2 = 4\pi \cdot 50 \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \frac{64^2}{16 \cdot 2} 34\,(1{,}94 + 0{,}88 + 1{,}43) = 0{,}147\ \textit{ом};$$

$$x_2' = kx_2 = 34{,}5 \cdot 0{,}147 = 5{,}07\ \textit{ом}$$

или в относительных единицах

$$x_2 = 5{,}07 \frac{140\sqrt{3}}{6000} = 0{,}205.$$



9. Реактивность взаимоиндукции

$$x_{m1} = \frac{F_{1N}}{F_N} = \frac{4290}{1800} = 2{,}38 \quad \text{или} \quad x_{m1} = 2{,}38 \frac{U_{\text{л}N}}{\sqrt{3} I_N} = 2{,}38 \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 140} = 58{,}9\ \textit{ом},$$

где

$$F_{1N} = \frac{m}{\pi p} w_1 k_{w1} I_{1N} \sqrt{2} = \frac{3}{\pi \cdot 16} 384 \cdot 0{,}945 \cdot 140 \sqrt{2} = 4290;$$

$$F_N = \frac{\delta'}{\mu_0} B_{\delta N} = 0{,}8 \cdot 10^8 \cdot 0{,}296 \cdot 0{,}772 \cdot 10^{-4} = 1800.$$

10. Коэффициент рассеяния статорной обмотки

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{m1}} = 1 + \frac{3{,}15}{58{,}9} \approx 1{,}054.$$

11. Данные для построения круговой диаграммы.

Параметры схемы замещения:

$$x_1' = x_1 c_1 = 3{,}15\,(1 + 0{,}054) = 3{,}32\ \textit{ом};$$

$$x_2'' = x_2' c_1^2 = 5{,}07\,(1 + 0{,}054)^2 = 5{,}62\ \textit{ом};$$

$$x_{\text{к}}'' = x_1' + x_2'' = 3{,}32 + 5{,}62 = 8{,}94\ \textit{ом};$$

$$r_1' = r_1 c_1 = 0{,}5\,(1 + 0{,}054) = 0{,}526\ \textit{ом};$$

$$r_2'' = r_2' c_1^2 = 0{,}67\,(1 + 0{,}054)^2 = 0{,}744\ \textit{ом}.$$

Диаметр круга тока $I_2'' = \frac{1}{c_1} \cdot I_2'$

$$D = \frac{U_1}{c_1 x_1 + c_1^2 x_2'} = \frac{U_1}{x_{\text{к}}''} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 8{,}94} = 388\ a.$$

Тангенс угла поворота круга тока $I_2''$ полагаем равным нулю.

12. Аналитическая проверка:

а) максимальный момент

$$M_{\max} = \frac{m_1 U_1^2}{2\,[r_1' + \sqrt{r_1'^2 + x_{\text{к}}''^2}]} = \frac{3\left(\frac{6000}{\sqrt{3}}\right)^2}{2\,[0{,}526 + \sqrt{0{,}526^2 + 8{,}94^2}]} = \frac{36 \cdot 10^6}{2 \cdot 9{,}48} =$$

$$= 1900 \cdot 10^3\ \textit{синхронных вт};$$

$$\frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{1900}{1000} = 1{,}9;$$

б) $$(\cos\varphi)_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2x_{\text{к}}''}{x_m}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 8{,}94}{58{,}9}} = 0{,}77;$$

в) $$\cos\varphi_N = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_0}{I_{a1}} + \frac{I_{a1}}{I_{2\text{к}}''}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{63{,}6}{104} + \frac{104}{388}\right)^2 + 1}} = 0{,}751,$$

где

$$I_{2\text{к}}'' = \frac{U_{\Phi}}{x_{\text{к}}''} = \frac{3470}{8{,}94} = 388\ a;$$

$$I_{a1} = \frac{P_N}{3U_{\Phi}\eta} = \frac{1000 \cdot 10^3}{3 \cdot 3470 \cdot 0{,}92} = 104\ a.$$

Полученные значения $M_{\max}$ и $\cos\varphi_N$ близки к заданным.

## XII. Расчет потерь и к. п. д. (§ 11-12)

1. Потери в железе при холостом ходе

$$p_{Fe} = c_{Fe} p_{10} [G_{j_1} (B_{j_1}\ вб/м^2)^2 + G_{z1} (B_{z1}\ вб/м^2)^2] \cdot 10^{-3} =$$
$$= 2{,}7 \cdot 2{,}8 [1390 \cdot 1{,}07^2 + 820 \cdot 1{,}55^2] \cdot 10^{-3} = 26{,}9\ квт,$$

где $c_{Fe} = 2{,}7$ (§ 11-12);

$p_{10} = 2{,}8$ *вт/кг* (приложение II для стали Э12);

$$G_{j_1} = \frac{\pi}{4} [D_j^2 - (D + 2h_{п1})^2]\, l_{Fe}\gamma_{Fe} \cdot 10^{-3} = \frac{\pi}{4} [296^2 - (296 + 2 \cdot 7{,}6)^2] \cdot 28{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot$$
$$\cdot 10^{-3} = 1390\ кг;$$

$$B_{z1} = B_{zx} \frac{b_{zx}}{b_{z12}} = 1{,}57 \cdot 10^{-4} \frac{1{,}66}{1{,}68} = 1{,}55 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2;$$

$$b_{z12} = \frac{\pi (D + h_{п1})}{z_1} - b_{п1} = \frac{\pi (267 + 7{,}6)}{288} - 1{,}3 = 2{,}98 - 1{,}3 = 1{,}68\ ом;$$

$$G_{z1} = Z_1 b_{z12} h_{п1} l_{Fe}\gamma_{Fe} \cdot 10^{-3} = 288 \cdot 1{,}68 \cdot 7{,}6 \cdot 28{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 820\ кг.$$

2. Потери в меди статора для $I_1 = 140$ *а*

$$p_{Cu_1} = 3 I_1^2 r_1 = 3 \cdot 140^2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 29{,}4\ квт.$$

3. Потери в меди ротора для $I_2 = 600$ *а*

$$p_{Cu_2} = 3 I_2^2 r_2 = 3 \cdot 600^2 \cdot 0{,}0194 \cdot 10^{-3} = 21{,}0\ квт.$$

4. Механические потери ($p_m = p_т + p_v$ — трение и вентиляция)

$$p_m = 0{,}7 \left(\frac{n}{1000}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1000}{P_2}\right)^{\frac{1}{4}} \% = 0{,}7 \left(\frac{187{,}5}{1000}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1000}{1000}\right)^{\frac{1}{4}} = 0{,}4\%,\ т.\ е.\ p_m = 4\ квт.$$

5. Сумма основных потерь

$$\Sigma p_{осн} = P_{Fe} + p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_m = 26{,}9 + 29{,}4 + 21{,}0 + 4{,}0 = 81{,}3\ квт.$$

6. Добавочные потери в меди статора

$$p_{Cu_1\ доб} = p_{Cu_1} (k_r - 1) = 29{,}4 (1{,}04 - 1) = 1{,}2\ квт.$$

7. Пульсационные потери в статоре (см. гл. 5):

$$p_{п1} = 0{,}5\sigma'_ф (\Delta Z_2 n B_{п1})^2 G_{z1} k_m,$$

где $\sigma'_ф = 1{,}8\sigma_ф = 1{,}8 \cdot 10{,}4 \cdot 10^6 = 18{,}7 \cdot 10^6$; $k_m \approx 1$;

$$B_{п1} = 0{,}5 \frac{t_2}{t_1} k_{C_1} (k_{C_2} - 1) B_{z1} = 0{,}5 \frac{4{,}36}{2{,}92} \cdot 1{,}325 (1{,}015 - 1) \cdot 1{,}55 \cdot 10^{-4} =$$
$$= 0{,}0231 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2;$$

$$p_{п1} = 0{,}5 \cdot 18{,}7 \cdot 10^6 (0{,}05 \cdot 192 \cdot \frac{187{,}5}{60} \cdot 0{,}0231 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 820 \cdot 10^{-3} = 0{,}037\ квт$$

(потери малы, так как ротор имеет полузакрытые пазы).

8. Пульсационные потери в роторе

$$p_{п2} = 0{,}5\sigma'_ф (\Delta Z_1 n B_{п2})^2 G_{z2} k_m,$$

где

$$B_{п2} = 0{,}5 \frac{t_1}{t_2} k_{C_2} (k_{C_1} - 1) B_{z2} = 0{,}5 \frac{2{,}92}{4{,}36} 1{,}015 (1{,}325 - 1) \cdot 1{,}18 \cdot 10^{-4} = 0{,}129 \cdot 10^{-4};$$

$$G_{z2} = Z_2 b_{z2} h_{п2} l_{Fe}\gamma_{Fe} \cdot 10^{-3} = 192 \cdot 3{,}31 \cdot 4{,}33 \cdot 28{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 612\ кг;$$

$$p_{п2} = 0{,}5 \cdot 18{,}7 \cdot 10^6 (0{,}05 \cdot 288 \cdot \frac{187{,}5}{60} \cdot 0{,}129 \cdot 10^{-4})^2\, 612 \cdot 10^{-3} = 1{,}93\ квт.$$



9. Сумма добавочных потерь

$$\Sigma p_{доб} = 1{,}2 + 0{,}037 + 1{,}93 \approx 3{,}17\ квт.$$

10. Общие потери

$$\Sigma p = \Sigma p_{осн} + \Sigma p_{доб} = 81{,}3 + 3{,}17 = 84{,}47\ квт.$$

11. Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{84{,}47}{1084{,}47} = 0{,}922\ (задано\ 0{,}92).$$

12. Скольжение

$$s = \frac{p_{Cu2}}{P_{12}};\ P_{12} = P_2 + p_{Cu2} + p_m = 1000 + 21 + 4 = 1025;$$
$$s = \frac{21{,}0}{1025{,}0} = 0{,}021\ (задано\ 2\%).$$

## XIII. Расчет средней температуры обмотки статора по методу гл. 6 (§ 11-13)

1. Удельные тепловые нагрузки в *вт/см²*:

а) от потерь в меди

$$w_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{\frac{1}{2} l_w \pi D} = \frac{29\,400}{100{,}9 \cdot \pi \cdot 267} = 0{,}348;$$

б) от потерь в железе

$$w_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{\pi D l} = \frac{26\,900}{\pi \cdot 267 \cdot 37} = 0{,}866;$$

в) изоляции

$$w_i = w_{Cu} \frac{t_1}{\Pi} = 0{,}348 \frac{2{,}92}{17{,}8} = 0{,}057;$$

где $\Pi$ — периметр паза; для открытого паза

$$\Pi = 2(h_п + b_п) = 2 (7{,}6 + 1{,}3) = 17{,}8\ см.$$

2. Превышение температуры охлаждающего воздуха принимаем

$$\Delta\theta_a = 25°\ C.$$

3. Расход воздуха

$$V_a = \frac{\Sigma p}{1{,}1\Delta\theta_a} = \frac{84{,}47}{1{,}1 \cdot 25} = 3{,}07\ м^3/сек.$$

4. Удельная теплоотдача в *вт/см² °С*;

а) в зазор

$$\alpha_\delta = 0{,}0028 (1 + \sqrt{0{,}5 v_a}) = 0{,}0028 (1 + \sqrt{0{,}5 \cdot 26{,}2}) = 0{,}013,$$

б) со спинки статора

$$\alpha_j = 0{,}0028 (1 + \sqrt{0{,}25 v_a}) = 0{,}0028 (1 + \sqrt{0{,}25 \cdot 26{,}2}) = 0{,}01;$$

в) в каналы

$$\alpha_s = 0{,}0016 (1 + 1{,}4 \sqrt{v_s}) = 0{,}0016 (1 + 1{,}4 \sqrt{5{,}91}) = 0{,}00705,$$

где $v_s$ — скорость воздуха в каналах

$$v_s = \frac{V_a}{\pi (D + h_п)\, n_s b_s} = \frac{3{,}07 \cdot 10^4}{\pi (267 + 7{,}6) \cdot 6 \cdot 1} = 5{,}91\ м^3/сек;$$

г) от железа статора

$$\alpha_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l} \left(\alpha_\delta \frac{b_{z1}}{t_1} + \alpha_j \frac{D_j}{D} + \frac{\alpha_s}{1 + 16{,}7 l' \alpha_s} \frac{0{,}7\tau}{l'}\right) =$$
$$= \frac{28{,}5}{37} \left(0{,}013 \frac{1{,}62}{2{,}92} + 0{,}01 \frac{296}{267} + \frac{0{,}00705}{1 + 16{,}7 \cdot 4{,}3 \cdot 0{,}00705} \cdot \frac{0{,}7 \cdot 26{,}2}{4{,}3}\right) = 0{,}0296$$

5. Условное превышение температуры в активной части

$$\theta_1' = \frac{w_{Cu} + w_{Fe}}{\alpha_{Fe}} + \frac{w_i}{k_i}\Delta_i + 0{,}5\Delta\theta_a = \frac{0{,}348 + 0{,}866}{0{,}0296} + \frac{0{,}057}{0{,}0011}\cdot 0{,}1 + 0{,}5\cdot 25 = 58{,}7^\circ\ C,$$

где $k_i = 0{,}0011$; $\Delta_i = 0{,}1$ *см*.

6. Условное превышение температуры в лобовой части

$$\theta_1'' = \frac{w_{Cu}}{\alpha_л}\frac{t_1}{k_0 П} + \frac{w_i}{k_i}\Delta_i + 0{,}25\Delta\theta_a = \frac{0{,}348}{0{,}0074}\cdot\frac{2{,}92}{0{,}7\cdot 17{,}8} + \frac{0{,}057}{0{,}0011}\cdot 0{,}1 + 0{,}25\cdot 25 = 22{,}5^\circ\ C,$$

где коэффициент обдуваемости $k_0$ принят 0,7;

$$\alpha_л = 0{,}00167\,(1 + \sqrt{0{,}45 v_a}) = 0{,}00167\,(1 + \sqrt{0{,}45\cdot 26{,}2}) = 0{,}0074.$$

Среднее превышение температуры

$$\theta_{ср} = \frac{\theta_1' l + \theta_1'' l_л}{l + l_л} = \frac{58{,}7\cdot 37 + 22{,}5\cdot 63{,}9}{100{,}9} = 35{,}8^\circ\ C.$$

Температура меди

$$\theta_{ср}^\circ = \theta_{ср} + \theta_{1\delta} = 35{,}8 + 35 = 70{,}8^\circ\ C,$$

т. е. машина имеет значительный тепловой запас.

Расчет температуры в роторе может быть произведен аналогичным образом. Однако из сравнения потерь в роторе и статоре легко видеть, что температура ротора будет меньше, чем температура статора.

## *Пример 2*

### Расчет двигателя с фазным ротором

#### I. Проектное задание (§ 11-2)

1. Отдаваемая мощность $P_2 = 155$ *квт* (продолжительная).
2. Назначение — общее.
3. Скорость вращения (синхронная) $n_1 = 1500$ об/мин; скольжение $s_N = 2\%$.
4. Фазное напряжение $U = U_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ *в*.
5. Частота $f = 50$ *гц*.
6. Тип — защищенный, ротор с кольцами.
7. Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}90$.
8. Коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}925$ ($\Sigma p = 155\,\frac{1 - 0{,}925}{0{,}925} = 12{,}55$ *квт*).
9. Кратность максимального момента $\frac{M_{max}}{M_N} = 3{,}2$.
10. Кратность пускового момента } не задаются, так как пуск производится
11. Кратность пускового тока } при посредстве реостата в роторе.
12. График и характер нагрузки, пределы регулирования скорости — нагрузка продолжительная, регулирования скорости нет.
13. Сопряжение фаз Y.

Полная подводимая мощность двигателя при заданном к. п. д. и $\cos\varphi$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta\cos\varphi} = \frac{155}{0{,}925\cdot 0{,}9} = 186\ ква.$$

Номинальный ток двигателя

$$I_N = \frac{P_1}{3U_1} = \frac{186\cdot 10^3}{3\cdot 220} = 282\ а.$$



Число пар полюсов согласно заданной скорости вращения

$$p = \frac{60 f_1}{n_1\ об/мин} = \frac{60\cdot 50}{1500} = 2.$$

#### II. Выбор основных размеров (§ 11-4)

1. Согласно гл. 2, рис. 205 и 7 выбираем $\beta = 0{,}77$ и $C_s = 3{,}8$; тогда полюсное деление

$$\tau = C_s\left(\frac{P_1\beta}{2p\sqrt{2} f_1 \lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}} = 3{,}8\left(\frac{186\cdot 10^3\cdot 0{,}77}{2\cdot 2\sqrt{2}\cdot 50\cdot 0{,}15}\right)^{\frac{1}{4}} = 30\ см$$

при $\lambda_1 = 0{,}15$ (рис. 205).

2. Диаметр расточки статора

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{2\cdot 2\cdot 30}{\pi} = 38{,}2\ см.$$

3. Принимаем $D = 38$ *см* и уточняем полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi 38}{2\cdot 2} = 29{,}96\ см \approx 30\ см.$$

4. Расчетная длина

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{30}{0{,}77} = 39\ см.$$

Проверяем длину по формуле

$$l_i = \frac{C_A P}{D^2 n} = \frac{6\cdot 186\cdot 10^3\cdot 60}{38^2\cdot 1500} = 31\ см,$$

где $C_A$ по рис. 206.

Принимаем $l_i = 39$ *см*.

#### III. Число каналов и воздушный зазор (§ 11-5, § 11-6)

Статор и ротор выполняются одинаковыми по длине с равным числом вентиляционных каналов. Исходя из допустимой ширины пакета $4\div 6$ *см* принимаем число каналов $n_s = 5$, ширину канала $b_s = 1$ *см*. Полная длина железа статора

$$l = l_i + 0{,}5 n_s b_s = 39 + 0{,}5\cdot 5\cdot 1 = 41{,}5\ см.$$

1. Ширина пакета

$$l' = \frac{l - n_s b_s}{n_s + 1} = \frac{41{,}5 - 5\cdot 1}{5 + 1} = 6{,}1\ см.$$

2. Длина чистого железа

$$l_{Fe} = (l - n_s b_s)\,k_п = (41{,}5 - 5\cdot 1)\cdot 0{,}92 = 33{,}6\ см.$$

3. Коэффициент заполнения длины железа

$$\varphi_{Fe}' = \frac{l_{Fe}}{l} = \frac{33{,}6}{41{,}5} = 0{,}81;$$

$$\varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i} = \frac{33{,}6}{39} = 0{,}862.$$

4. Воздушный зазор

$$\delta_{min} \approx 0{,}1 + 0{,}02\sqrt{Dl} = 0{,}1 + 0{,}02\sqrt{38\cdot 41{,}5} = 0{,}894\ мм.$$

Выбираем величину воздушного зазора $\delta = 0{,}9$ *мм*.

## IV. Обмотка и пазы статора (§ 11-7)

Выбираем двухслойную обмотку и полузакрытый паз статора (см. рис. 235) с числом пазов на полюс и фазу $q = 5$.

1. Общее число пазов

$$Z_1 = 2pq_1m_1 = 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 3 = 60.$$

2. Шаг паза

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 38}{60} = 1{,}99 \text{ см.}$$

Обмотку выбираем с укороченным шагом, равным $y = 0{,}8$,

$$y_п = \frac{Z_1}{2p} - \varepsilon.$$

Полагая сокращение шага $\varepsilon = 3$, имеем

$$y_п = \frac{60}{2 \cdot 2} - 3 = 12; \quad y = \frac{y_п 2p}{Z_1} = \frac{12 \cdot 4}{60} = 0{,}8.$$

3. Обмоточный коэффициент

$$k_{w1} = k_y \, k_p = 0{,}95 \cdot 0{,}96 = 0{,}91,$$

где

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) = 0{,}95;$$

$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q_1 \sin \frac{\pi}{6q_1}} = 0{,}96.$$

4. Задаемся средней индукцией в зубцах $B = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*.

5. При $\zeta = \frac{b_z}{t_1} = 0{,}555$ и $\varphi_{Fe} = 0{,}862$ индукция в зазоре

$$B_\delta = B\zeta\varphi_{Fe} = 1{,}4 \cdot 0{,}555 \cdot 0{,}862 \cdot 10^{-4} = 0{,}67 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2,$$

что соответствует данным для построенных машин (рис. 207).

6. Магнитный поток основной волны

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \, l_i \tau B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 39 \cdot 30 \cdot 0{,}67 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ вб.}$$

7. Электродвижущую силу $E_{10}$ можно ориентировочно принять равной

$$E_{10} = \frac{U}{1 + \sigma_1} \approx (0{,}97 \div 0{,}95)\, U_1 = 0{,}96 \cdot 220 = 211 \text{ в.}$$

8. Число витков

$$w_1 = \frac{E_{10}}{\pi \sqrt{2} f_1 k_{w1} \Phi} = \frac{211}{\pi \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0{,}91 \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \approx 20 \text{ витков.}$$

Число витков должно удовлетворять условию $w_1 = s_п pq$, где $s_п$ — число последовательно соединенных проводников в пазу

$$s_п = \frac{w_1}{pq} = \frac{20}{2 \cdot 5} = 2.$$

Принимаем $w_1 = 20$ витков на фазу.

9. Магнитный поток и индукция в воздухе

$$\Phi = \frac{E_{10}}{\pi \sqrt{2} f_1 k_{w1} w_1} = \frac{211}{\pi \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0{,}91 \cdot 20} = 5{,}25 \cdot 10^{-2} \text{ вб;}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \tau l_i} = \frac{5{,}25 \cdot 10^{-2}}{\frac{2}{\pi} \cdot 30 \cdot 39} = 0{,}705 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2.$$



10. Линейная нагрузка статора

$$A = \frac{2m_1 w_1 I_1}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 20 \cdot 282}{\pi 38} = 284 \text{ а/см.}$$

11. Выбираем число параллельных ветвей $a = 2$ из условий получения удобного для намотки провода.

12. Предварительно принимаем плотность тока $s_1 = 3{,}5$ *а/мм²*. Тогда общее сечение фазового провода

$$q_{ф_1} = \frac{I_1}{s_1} = \frac{282}{3{,}5} = 80{,}8 \text{ мм}^2.$$

Сечение проводника в одной параллельной ветви

$$q'_{ф_1} = \frac{q_{ф_1}}{a} = \frac{80{,}8}{2} = 40{,}4 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по стандарту провод ПБД размером $3{,}05 \times 6{,}9$ *мм*, что соответствует сечению $q_{Cu_1} = 20{,}6$ *мм²*, и берем два параллельных частичных проводника.

13. Окончательно плотность тока будет

$$s_1 = \frac{I_1}{q_{ф_1}} = \frac{282}{2 \cdot 2 \cdot 20{,}6} = 3{,}43 \text{ а/мм}^2.$$

14. Изоляция проводника состоит из двух слоев хлопчатобумажной пряжи. Для провода ПБД по ГОСТу толщина изоляции равна 0,15 *мм* на сторону. Следовательно, размер изолированного проводника будет $3{,}35 \times 7{,}2$ *мм*. Пазовую изоляцию выбираем по приложению V.

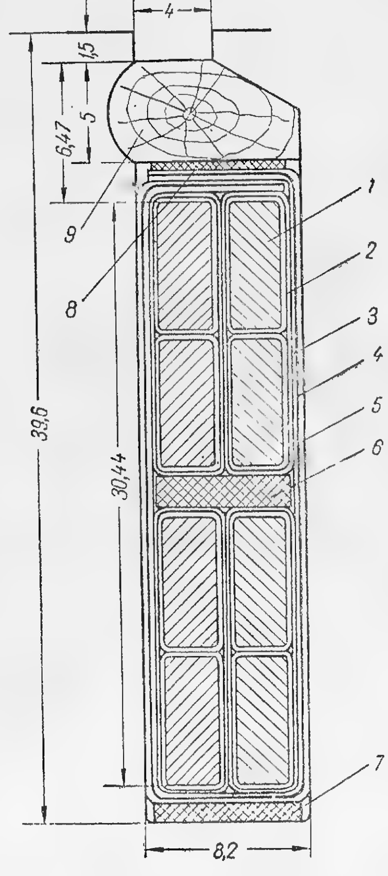



Рис. 235. Паз статора.

15. Размеры паза (рис. 235):

| | по ширине | по высоте |
|---|---|---|
| *1* — проводники | $2 \times 3{,}35 = 6{,}7$ | $4 \times 7{,}2 = 28{,}8$ |
| *2* — бумага телефонная (скрепляющая) | $4 \times 0{,}07 = 0{,}28$ | $4 \times 0{,}07 = 0{,}28$ |
| *3* — электрокартон | $2 \times 0{,}15 = 0{,}30$ | $3 \times 0{,}15 = 0{,}45$ |
| *4* — лакоткань | $2 \times 0{,}2 = 0{,}40$ | $3 \times 0{,}2 = 0{,}60$ |
| *5* — электрокартон пропитанный | $2 \times 0{,}2 = 0{,}40$ | $3 \times 0{,}2 = 0{,}60$ |
| *6* — электрокартон пропитанный | — | $1 \times 0{,}3 = 0{,}30$ |
| *7* — электрокартон пропитанный | — | $1 \times 1{,}5 = 1{,}5$ |
| *8* — электрокартон пропитанный | — | $1 \times 0{,}5 = 0{,}5$ |
| *9* — клин | — | $1 \times 5 = 5{,}0$ |
| *10* — зазор | 0,12 | 0,07 |

$b_{п_1} = 8{,}2$ *мм*; $h_{п_1} = 39{,}6$ *мм*.

16. Средняя длина полувитка

$$\frac{1}{2} l_{w1} = l + 1{,}6\tau' y + 2U_л + \pi\left(r + \frac{h_{п1}}{2}\right) = 41{,}5 + 1{,}6 \cdot 32{,}9 \cdot 0{,}8 +$$

$$+ 2\cdot 0{,}38 + \pi\left(2+\frac{3{,}96}{2}\right) = 96{,}96\ см \approx 100\ см,$$

где

$$\tau' = \frac{\pi(D+h_{п1})}{2p} = \frac{\pi(38+3{,}96)}{2\cdot 2} = 32{,}9.$$

17. Омическое сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \rho_{75}\frac{l_{w1}w_1}{q_{ф1}} = 2{,}17\cdot 10^{-6}\cdot\frac{2\cdot100\cdot20}{2\cdot2\cdot0{,}206} = 0{,}0102\ ом;$$

$$r_1 = \frac{r_1 I_N}{U_N} = \frac{0{,}0102\cdot 282}{220} = 0{,}013.$$

18. Вес меди статора

$$G_{Cu_1} = \gamma_{Cu} l_{w1} w_1 q_{ф1} m_1 = 8{,}9\cdot10^{-3}\cdot 2\cdot100\cdot20\cdot0{,}206\cdot4\cdot3 = 88{,}0\ кг.$$

19. Задаемся индукцией в ярме $B_j = 13\,000$ *гс* (1,3 *вб/м²*). Тогда высота спинки ярма

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 l_{Fe} B_{j1}} = \frac{5{,}25\cdot10^{-2}}{2\cdot33{,}6\cdot1{,}3\cdot10} = 6\ см.$$

20. Внешний диаметр статора

$$D_j = D + 2h_{п1} + 2h_{j1} = 38 + 2\cdot3{,}96 + 2\cdot6 = 57{,}92\ см.$$

Округляем до диаметра серийных машин

$D_j = 56$ *см* (приложение I);

при этом $h_{j1} = 5{,}04$ *см*; $B_{j1} = 1{,}3\cdot10^{-4}\frac{6{,}0}{5{,}04} = 1{,}56\cdot10^{-4}$ *вб/см²*.

V. Ротор (§ 11-8, 11-9)

1. Число пазов

$$Z_2 = 2pq_2m_2;\ m_2 = m_1.$$

Для ротора выбираем двухслойную стержневую обмотку. Число пазов на полюс и фазу $q_2 = 4$, тогда $Z_2 = 2\cdot2\cdot4\cdot3 = 48$ пазов.

2. Пазовое деление ротора

$$t_2 = \frac{\pi(D-2\delta)}{Z_2} = \frac{\pi(38-2\cdot0{,}09)}{48} = 2{,}48\ см.$$

3. Диаметр ротора

$$D_r = D - 2\delta = 38 - 2\cdot0{,}09 = 37{,}82\ см.$$

4. Число витков ротора

$$w_2 = \frac{Z_2 s_{п2}}{2m_2} = \frac{48\cdot2}{2\cdot3} = 16,$$

где $s_{п2}$ — число проводников в пазу ротора, соединенных последовательно.

Принимая по табл. 64 $U_2 = 175$ *в*, получаем

$$s_{п2} = \frac{2m_1w_1}{Z_2}\frac{U_2}{U_1} = \frac{2\cdot3\cdot20}{48}\cdot\frac{175}{220} = 2.$$

5. Электродвижущая сила на фазу ротора

$$E_{20} = E_{10}\frac{w_2k_{w2}}{w_1k_{w1}} = 211\frac{16\cdot0{,}965}{20\cdot0{,}91} = 179{,}5\ в,$$



где

$$k_{w2} = k_р = \frac{0{,}5}{q_2\sin\frac{\pi}{2mq_2}} = \frac{0{,}5}{4\sin\frac{\pi}{2\cdot3\cdot4}} = 0{,}965.$$

$k_у = 1$, так как обмотка — диаметральная.

6. Фазный ток ротора при нагрузке (если приближенно принять, что потери холостого хода составляют 1,5% от $P_2$)

$$I_2 = \frac{P_2(1+0{,}015)}{m_2E_{20}(1-s_N)} = \frac{155(1+0{,}015)10^3}{3\cdot179{,}5(1-0{,}02)} = 298\ а,$$

где $s_N$ — номинальное скольжение, принятое равным 2%.

Задаемся плотностью тока в роторе $s_2 = 4$ *а/мм²*. Тогда сечение проводника ротора

$$q_{ф2} = \frac{I_2}{s_2} = \frac{298}{4} = 74{,}5\ мм^2.$$

Проверяем сечение по заданному номинальному скольжению

$$s_N \approx r_2' = 0{,}02 = \frac{r_2' I_N}{U_N},$$

откуда $r_2' = 0{,}02\frac{U_N}{I_N} = 0{,}02\frac{220}{282} = 0{,}0156$ *ом*;

$$r_2 = r_2'\left(\frac{w_2k_{w2}}{w_1k_{w1}}\right)^2 = 0{,}0156\left(\frac{16\cdot0{,}965}{20\cdot0{,}91}\right)^2 = 0{,}0112\ ом.$$

$$q_{ф2} = \rho_{75}\frac{l_{w2}w_2}{r_2} = 2{,}17\cdot10^{-6}\frac{191\cdot16}{0{,}0112} = 0{,}59\ см^2,$$

где

$$l_{w2} = 2(l + 1{,}8\tau) = 2(41{,}5+1{,}8\cdot30) = 191\ см;$$

Рис. 236. Паз ротора.

7. Выбираем обмоточную медь ПБД размером 10 × 3,8 = 37,5 *мм²* — два в параллель.

Сечение стержня ротора

$$q_{ф2} = 37{,}5\times2 = 75\ мм^2\ (0{,}75\ см^2).$$

8. Плотность тока

$$s_2 = \frac{298}{75} = 3{,}98\ а/мм^2.$$

Размеры провода с изоляцией 10,3 × 4,1 *мм*.

9. Заполнение паза (рис. 236):

по ширине

| | | |
|---|---|---|
| проводники | 2 × 4,1 = | 8,2 |
| гильза | 2 × 0,75 = | 1,5 |
| микалента | 2 × 0,2 = | 0,4 |
| зазор | | 0,5 |
| ширина паза | $b_{п2}$ = | 10,6 *мм* |

по высоте

| | | |
|---|---|---|
| проводники | 2 × 10,3 = | 20,6 |
| гильза | 2 × 2 × 0,75 = | 3,0 |
| прокладка | | 1,0 |
| микалента | 2 × 0,2 = | 0,4 |
| зазор | | 0,5 |
| высота клина | | 2,5 |
| высота надклиновой части | | 1,0 |
| высота паза | $h_{п2}$ = | 29,0 *мм* |

## VI. Внутренний диаметр пакетов ротора (§ 11-9)

1. Задавшись $B_{j_2} = 1,1$ *вб/м²*, найдем высоту ярма

$$h_{j_2} = \frac{\Phi}{2l_{Fe}B_{j_2}} = \frac{5,25\cdot10^{-2}}{2\cdot33,6\cdot1,1\cdot10^{-4}} = 7,1\ см.$$

2. Внутренний диаметр ротора

$$D_j = D - 2\delta - 2h_{п_2} - 2h_{j_2} = 38 - 2\cdot0,09 - 2\cdot2,9 - 2\cdot7,1 = 17,82\ см.$$

3. Проверка максимальной индукции в зубцах ротора

$$B_{max} = B_{\delta_1}\frac{l_1t_2}{l_{Fe}b_{min}} = 0,705\cdot10^{-4}\cdot\frac{39\cdot2,48}{33,6\cdot1,05} = 19\,300\ гс,$$

где

$$b_{min} = t_{23} - b_{п_2} = 2,1 - 1,06 = 1,05;\quad t_{23} = \frac{\pi(D_r - 2h_{п2})}{Z_2} = 2,1\ см.$$

## VII. Расчет намагничивающего тока (§ 11-10)

1. М. д. с. на два воздушных зазора:

$$2F_\delta = \frac{2}{\mu_0}B_\delta\delta',$$

где $\delta'$ — эффективный воздушный зазор, причем

$$\delta' = k_C\delta,$$

$\delta$ — действительный зазор, равный 0,09 *см*; $k_C$ — коэффициент Картера, учитывающий зубчатость статора и ротора.

Для статора

$$k_{C_1} = \frac{t_1}{t_1-b_1} = \frac{1,99}{1,99-0,188} = 1,1;$$

$$b_1 = b_0\frac{b_0}{5\delta+b_0} = 0,4\frac{0,4}{5\cdot0,09+0,4} = 0,188\ см,$$

где $b_0$ — ширина открытия паза, равная 0,4 *см*; $t_1 = 1,99$ *см*.

Для ротора $t_2 = 2,48$ *см*; $b_{02} = 0,5$ *см*;

$$b_2 = 0,5\frac{0,5}{5\cdot0,09+0,5} = 0,263\ см;$$

$$k_{C2} = \frac{2,48}{2,48-0,263} = 1,12.$$

Результирующий коэффициент Картера

$$k_C = k_{C_1}k_{C_2} = 1,1\cdot1,12 = 1,23;$$

следовательно,

$$\delta' = k_C\delta = 1,23\cdot0,09 = 0,111\ см.$$

Задаваясь коэффициентом насыщения $k_н = 1,2$, по рис. 17, б находим $\alpha_i = 0,68$;

$$B_\delta = B_{\delta_1}\frac{2}{\pi\alpha_i} = 0,705\cdot10^{-4}\cdot\frac{0,636}{0,68} = 0,66\cdot10^{-4};$$

$$2F_\delta = \frac{2\cdot10^8}{1,26}\cdot0,66\cdot10^{-4}\cdot0,111 \approx 1100.$$

2. Магнитодвижущую силу на зубцы достаточно рассчитать по сечению $x$ зубца на $\frac{1}{3}$ высоты $\left(x = \frac{1}{3}\right)$. Ширина зубца статора на $\frac{1}{3}$ высоты равна

$$b_{1x} = t_1\left(1 + \frac{2\cdot\frac{1}{3} h_{п_1}}{D}\right) - b_{п_1} = 1,99\left(1+\frac{2\cdot\frac{1}{3}\cdot3,96}{38}\right) - 0,82 = 1,305\ см.$$



Условная индукция в этом месте

$$B'_{z1x} = \frac{l_1t_1}{l_{Fe}b_{z1x}}B_{\delta_1} = \frac{39\cdot1,99}{33,6\cdot1,305}\cdot0,705\cdot10^{-4} = 1,25\cdot10^{-4}\ вб/см^2.$$

Действительная индукция в зубце практически имеет то же самое значение.

По значению индукции $1,25\cdot10^{-4}$ *вб/см²* согласно приложению II определяем ампер-витки $aw_z$ (или соответствующую им напряженность магнитного поля $H_z$) с учетом уплощения кривой

$$H_{z1} = aw_{z1} = 7,14\ а/см.$$

Следовательно, получим

$$2F_{z1} = 2h_{п_1}H_{z1} = 2\cdot3,96\cdot7,14 = 56,5\ а.$$

3. Для зубцов ротора:

$$b_{2x} = t_2\left(1 - \frac{2\cdot\frac{2}{3} h_{п2}}{D-2\delta}\right) - b_{п2} = 2,48\left(1-\frac{2\cdot\frac{2}{3}\cdot2,9}{38-2\cdot0,09}\right) - 1,06 = 1,16\ см;$$

$$B_{z2x} = \frac{39\cdot2,48}{33,6\cdot1,16}\cdot0,705\cdot10^{-4} = 1,75\cdot10^{-4}\ вб/см^2;$$

$$aw_{z2} = 31;\quad 2F_{z2} = 2\cdot2,9\cdot31 = 180\ а.$$

4. Определим магнитодвижущую силу на ярмо:
при $B_{j_1} = 1,56\cdot10^{-4}$ *вб/см²* $aw_{j1} = 11,3$ *а/см*;

$$L_{j1} = \frac{\pi(D_{j1}-h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(56-5,04)}{2\cdot2} = 40\ см;$$

$$2F_{j1} = H_{j1}L_{j1} = 11,3\cdot40 = 452\ а.$$

5. Аналогично определяется индукция в ярме ротора. При

$$B_{j2} = \frac{5,25\cdot10^{-2}}{2\cdot33,6\cdot7,1} = 1,11\cdot10^{-4}\ вб/см^2;$$

$$aw_{j2} = 3,38\ а/см;$$

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_r - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(37,82-7,1)}{2\cdot2} = 24,2\ см;$$

$$2F_{j2} = 3,38\cdot24,2 = 82а.$$

Сложив все частичные м. д. с., получим м. д. с. для магнитной цепи (на пару полюсов) при холостом ходе:

| | |
|---|---|
| ярмо статора . . . . . . . . | $2F_{j1} = 452,0$ |
| зубцы статора . . . . . . . . | $2F_{z1} = 56,5$ |
| воздушный зазор . . . . . . . . | $2F_\delta = 1100,0$ |
| зубцы ротора . . . . . . . . | $2F_{z2} = 180,0$ |
| ярмо ротора . . . . . . . . | $2F_{j2} = 82,0$ |
| | $2F = 1870,0\ а$ |

6. Проверка коэффициента насыщения

$$k_н = \frac{2F_\delta+2F_{z1}+2F_{z2}}{2F_\delta} = \frac{1100+56,5+180}{1100} = 1,21$$

(предварительно было взято $k_н = 1,2$).

7. Намагничивающий ток

$$I_{0р} = \frac{p2F}{0,9m_1w_1k_{w1}} = \frac{2\cdot1870}{0,9\cdot3\cdot20\cdot0,91} = 76\ а,$$

или в процентах от $I_N$ $\frac{76}{282}\cdot100 = 27\%$.

## VIII. Параметры статора и ротора (гл. 4)

1. Проводимости рассеяния (рис. 235):

$$\lambda_{п1} = \frac{3y+1}{4}\left(\frac{1}{3}\frac{h_1}{b_{п1}} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{h_0}{b_0}\right) =$$

$$= \frac{3 \cdot 0{,}8 + 1}{4}\left(\frac{1}{3} \cdot \frac{30{,}44}{8{,}2} + \frac{6{,}47}{8{,}2} + \frac{1{,}5}{4}\right) = 2{,}04;$$

$$\lambda_{л1} = 0{,}57\frac{\tau}{l_i} q_1 \frac{3y-1}{2} = 0{,}57 \cdot \frac{30}{39} \cdot 5 \cdot \frac{1{,}4}{2} = 1{,}54;$$

$$\lambda_{\delta 1} = \frac{Z_1 k^2_{w1}}{2p\pi^2}\frac{\tau}{\delta'}\sigma_{\delta_1} = \frac{60 \cdot 0{,}91^2 \cdot 30}{2 \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}111} \cdot 0{,}0034 = 1{,}16;$$

$$\sigma_{\delta_1} = \sigma_B + \sigma_z.$$

Произведение коэффициента рассеяния в зазоре $\sigma_{\delta_1}$ на $k^2{}_{w1}$ определяем по табл. 4 и рассчитываем $\sigma_\delta$ по отдельным составляющим согласно гл. 4.

$$\sigma_z = 0{,}7\left(\frac{1}{m_1 q_1}\right)^2 = 0{,}7\left(\frac{1}{3 \cdot 5}\right)^2 = 0{,}0031$$

и $\sigma_B$ по рис. 26: при $y = 0{,}8$ $\sigma_B = 0{,}0003$. Тогда $\sigma_{\delta_1} = \sigma_B + \sigma_z = 0{,}0003 + 0{,}0031 = 0{,}0034$.

2. Полная реактивность рассеяния обмотки статора

$$x_1 = 4\pi f_1 \mu_0 \frac{w_1^2 l_i}{pq_1}(\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{\delta 1}) =$$

$$= 4\pi \cdot 50 \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{20^2 \cdot 39}{2 \cdot 5}(2{,}04 + 1{,}54 + 1{,}16) = 0{,}06 \text{ ом};$$

$$x_1 = \frac{x_1 I_N}{U_N} = \frac{0{,}06 \cdot 282}{220} = 0{,}078.$$

3. Омическое сопротивление фазы ротора при 75°С

$$r_2 = \rho_{75}\frac{l_{w2} w_2}{q_{ф2}} = 2{,}17 \cdot 10^{-6}\frac{2 \cdot 100 \cdot 16}{75} = 0{,}009 \text{ ом},$$

где длина полувитка ротора принята равной $^1/_2\, l_{w1}$.

4. Вес меди обмотки ротора

$$G_{Cu_2} = \gamma_{Cu} l_{w2} m_2 q_{ф2} = 8{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 100 \cdot 16 \cdot 3 \cdot 0{,}75 = 64{,}1 \text{ кг}.$$

5. Реактивность рассеяния ротора.
Пазовая проводимость (см. рис. 236)

$$\lambda_{п2} = \frac{1}{3}\frac{h_1}{b_п} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{h_0}{b_0} = \frac{1 \cdot 2{,}13}{3 \cdot 1{,}06} + \frac{0{,}41}{0{,}78} + \frac{0{,}1}{0{,}5} = 1{,}4.$$

6. Дифференциальная проводимость

$$\lambda_{\delta_2} = \frac{Z_2 k^2 w_2}{2p\pi^2}\frac{\tau}{\delta'}\sigma_{\delta_2} = \frac{48 \cdot 30}{2 \cdot 2\pi^2 \cdot 0{,}111} 0{,}0082 = 2{,}69,$$

где $\sigma_{\delta_2} k^2{}_{w2} = 0{,}0082$ (табл. 4).

7. Проводимость рассеяния лобовой части

$$\lambda_{л2} = 0{,}57\frac{30}{39} 4 \frac{3-1}{2} = 1{,}75$$

(приближенно принято $k_{л_1} = k_{л_2} = 0{,}57$).



8. Реактивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$x_2 = 4\pi f \mu_0 \frac{w_2^2 l_i}{pq_2}(\lambda_{п_2} + \lambda_{л_2} + \lambda_{\delta_2}) =$$

$$= 4\pi \cdot 50 \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8}\frac{16^2 \cdot 39}{2 \cdot 4}(1{,}4 + 1{,}75 + 2{,}69) = 0{,}0575 \text{ ом}.$$

9. Приведение параметров ротора к статору. Коэффициент приведения

$$k = \frac{m_1}{m_2}\left(\frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}}\right)^2 = \frac{3}{3}\left(\frac{20 \cdot 0{,}91}{16 \cdot 0{,}965}\right)^2 = 1{,}39.$$

10. Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, приняв для обмотки ротора $k_r = 1$,

$$r'_2 = 0{,}009 \cdot 1{,}39 = 0{,}0125 \text{ ом}$$

или

$$r_2 = \frac{r'_2 I_N}{U_N} = \frac{0{,}0125 \cdot 282}{220} = 0{,}016.$$

11. Реактивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$x'_2 = 0{,}0575 \cdot 1{,}39 = 0{,}08 \text{ ом}$$

или

$$x_2 = \frac{0{,}08 \cdot 282}{220} = 0{,}1025.$$

12. Активное сопротивление короткого замыкания, приняв для обмотки статора $k_r = 1{,}156$,

$$r_к = r_1 k_r + r'_2 = 0{,}0102 \cdot 1{,}156 + 0{,}0125 = 0{,}0243 \text{ ом}$$

или

$$r_к = \frac{0{,}0243 \cdot 282}{220} = 0{,}0312.$$

13. Реактивное сопротивление короткого замыкания (без учета намагничивающего контура)

$$x_к = x_1 + x'_2 = 0{,}06 + 0{,}08 = 0{,}14 \text{ ом}$$

или

$$x_к = 7{,}8 + 10{,}25 = 18{,}05\%.$$

14. Ток короткого замыкания (без учета намагничивающего тока)

$$I_{к1} = \frac{U_1}{\sqrt{r_к^2 + x_к^2}} = \frac{220}{\sqrt{0{,}0243^2 + 0{,}14^2}} = 1550 \text{ а}.$$

15. Кратность тока короткого замыкания

$$k_i = \frac{1550}{282} = 5{,}49.$$

16. $$\cos\varphi_к = \frac{r_к}{\sqrt{r_к^2 + x_к^2}} = \frac{0{,}0243}{\sqrt{0{,}0243^2 + 0{,}14^2}} = 0{,}171.$$

## IX. Определение потерь и построение круговой диаграммы (§ 11-12, § 11-11)

1. Потери в меди. Основные джоулевы потери в обмотке статора

$$p_{Cu\,1\,осн} = m_1 I_1^2 r_1 = 3 \cdot 282^2 \cdot 0{,}0102 = 2430 \text{ вт}.$$

Полные потери в меди

$$p_{Cu1} = p_{Cu\,1\,осн} k_r = 2430 \cdot 1{,}156 = 2810 \text{ вт}.$$

Потери в обмотке ротора

$$p_{\text{Cu}2} = m_2 I_2^2 r_2 = 3 \cdot 298^2 \cdot 0{,}009 = 2400 \text{ } вт.$$

2. Потери в железе статора. Пакеты железа статора изготовлены из листовой стали Э12 толщиной 0,5 *мм* с удельными потерями $p_{10} = 2{,}8$ *вт/кг*, $c_{\text{Fe}} = 2$. Индукция в ярме статора $B_{j_1} = 1{,}56 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*.

Вес ярма статора

$$G_{j_1} = \gamma_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} \left[ \left( \frac{D_j}{2} \right)^2 - \left( \frac{D}{2} + h_{\text{п}1} \right)^2 \right] \pi =$$

$$= 7{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 33{,}6 \left[ \left( \frac{56}{2} \right)^2 - \left( \frac{38}{2} + 3{,}96 \right)^2 \right] \pi = 212 \text{ } кг.$$

Вес зубцов статора

$$G_{21} = \gamma_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} Z_1 b_{z12} h_{\text{п}1} = 7{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 33{,}6 \cdot 60 \cdot 1{,}38 \cdot 3{,}96 = 86 \text{ } кг,$$

где

$$b_{z12} = t_1 \frac{D + h_{\text{п}1}}{D} - b_{\text{п}1} = 1{,}99 \frac{38 + 3{,}96}{38} - 0{,}82 = 1{,}38 \text{ } см.$$

Вес зубцов ротора

$$G_{22} = \gamma_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} Z_2 b_{z22} h_{\text{п}2} = 7{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 33{,}6 \cdot 48 \cdot 1{,}23 \cdot 2{,}9 = 44{,}9 \text{ } кг,$$

где

$$b_{z22} = t_2 \frac{D_r - h_{\text{п}2}}{D_r} - b_{\text{п}2} = 2{,}48 \frac{37{,}82 - 2{,}9}{37{,}82} - 1{,}06 = 1{,}23 \text{ } см.$$

Принимаем $B_{z12} \approx B_{z1x}$ $\left( x = \frac{1}{3} \right.$ высоты паза). Потери в железе при холостом ходе

$$p_{\text{Fe}} = c_{\text{Fe}} p_{10} \left( G_{j1} B_{j_1}^2 + G_{21} B_{z12}^2 \right) 10^{-3} =$$

$$= 2 \cdot 2{,}8 (212 \cdot 1{,}56^2 + 86 \cdot 1{,}25^2) \cdot 10^{-3} = 3{,}64 \text{ } квт.$$

3. Механические потери

$$p_m = p_{\text{т}} + p_v = 0{,}7 \left( \frac{n}{1000} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1000}{P_2} \right)^{\frac{1}{4}} = 0{,}7 \left( \frac{1500}{1000} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1000}{155} \right)^{\frac{1}{4}} = 1{,}27\%$$

или

$$p_m = 0{,}0127 \cdot 155 = 1{,}97 \text{ } квт.$$

4. Пульсационные потери в зубцах.

Амплитуда пульсаций в зубцах статора

$$B_{\text{п}1} = \frac{1}{2} \frac{t_2}{t_1} k_{C1} (k_{C2} - 1) B_{z12} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2{,}48}{1{,}99} 1{,}10 (1{,}12 - 1) \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-4} = 1{,}03 \cdot 10^{-5};$$

Амплитуда пульсации в зубцах ротора, принимая $B_{z22} \approx B'_{z2x}$ $\left( x = \frac{1}{3} \right.$ высоты паза$\left. \right)$,

$$B_{\text{п}2} = \frac{1}{2} \frac{t_1}{t_2} k_{C2} (k_{C1} - 1) B_{z22} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1{,}99}{2{,}48} 1{,}12 (1{,}1 - 1) 1{,}75 \cdot 10^{-4} = 7{,}87 \cdot 10^{-5}.$$

Пульсационные потери в зубцах статора

$$p_{\text{п}1} = \frac{1}{2} \sigma'_{\text{ф}} (\Delta Z_2 n B_{\text{п}1})^2 G_{21} k_m =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1{,}8 \cdot 10{,}4 \cdot 10^6 \left( 0{,}05 \cdot 48 \cdot \frac{1500}{60} 1{,}03 \cdot 10^{-5} \right)^2 86 \cdot 1 = 313 \text{ } вт;$$

$$\sigma'_{\text{ф}} \approx (1{,}8 \div 2) \, \sigma_{\text{ф}}; \quad k_m = 1; \quad \sigma_{\text{ф}} = 10{,}4 \cdot 10^6 \text{ по табл. 5.}$$



Пульсационные потери в зубцах ротора

$$p_{\text{п}2} = \frac{1}{2} \sigma'_{\text{ф}} (\Delta Z_1 n B_{\text{п}2})^2 G_{22} k_m =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1{,}8 \cdot 10{,}4 \cdot 10^6 \left( 0{,}05 \cdot 60 \cdot \frac{1500}{60} \cdot 7{,}87 \cdot 10^{-5} \right)^2 \cdot 44{,}9 \cdot 1 = 1460 \text{ } вт.$$

5. Сумма потерь в *вт*:

потери в меди обмотки статора . . . . . . . . $p_{\text{Cu}1} = 2810$
потери в меди обмотки ротора . . . . . . . . $p_{\text{Cu}2} = 2400$
потери в железе статора . . . . . . . . . . . $p_{\text{Fe}} = 3640$
пульсационные потери в зубцах статора . . . . $p_{\text{п}1} = 313$
пульсационные потери в зубцах ротора . . . . $p_{\text{п}2} = 1460$
потери на трение и вентиляцию . . . . . . $p_{\text{т}} + p_v = 1970$

Сумма потерь $\Sigma p = 12\,593$ *вт*.

6. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P}{P + \Sigma p} \cdot 100 = \frac{155}{155 + 12{,}593} \cdot 100 = 92{,}5\%.$$

7. Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a} = \frac{p_{\text{Fe}} + p_{\text{п}1} + p_{\text{п}2} + p_{\text{т}} + p_v}{mU_1} = \frac{7383}{3 \cdot 220} = 11{,}2 \text{ } a.$$

8. Ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{0\text{р}}^2 + I_{0\text{а}}^2} = \sqrt{76^2 + 11{,}2^2} = 76{,}9 \text{ } a.$$

9. Коэффициенты рассеяния

$$\sigma_1 = \frac{x_1 I_{0\text{р}}}{U - x_1 I_{0\text{р}}} = \frac{x_1}{x_m} = \frac{0{,}06 \cdot 76}{220 - 0{,}06 \cdot 76} = 0{,}0212; \quad c_1 = 1{,}02;$$

$$x_m = \frac{E_{10}}{I_0} = \frac{215{,}45}{76} = 2{,}84 \text{ } ом;$$

$$\sigma_2 = \frac{x'_2}{x_1} \sigma_1 = \frac{0{,}08}{0{,}06} \cdot 0{,}02 = 0{,}0282; \quad c_2 = 1{,}028.$$

10. Данные для построения круговой диаграммы.

Параметры для построения круговой диаграммы с учетом $\sigma_1$:

активное и реактивное сопротивления статора

$$r'_1 = r_1 k_r c_1 = 0{,}0102 \cdot 1{,}156 (1 + 0{,}02) = 0{,}012 \text{ } ом;$$

$$x'_1 = x_1 c_1 = 0{,}06 \cdot 1{,}02 = 0{,}0615 \text{ } ом;$$

активное и реактивное сопротивления ротора

$$r''_2 = r'_2 c_1^2 = 0{,}0125 \cdot 1{,}02^2 = 0{,}0131 \text{ } ом;$$

$$x''_2 = x'_2 c_1^2 = 0{,}08 \cdot 1{,}02^2 = 0{,}0835 \text{ } ом;$$

$$x''_{\text{к}} = x'_1 + x''_2 = 0{,}0615 + 0{,}0835 = 0{,}145 \text{ } ом.$$

Пусковой ток

$$I_{1\text{к}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + \left( x_1 + \frac{x_2}{c_2} \right)^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0{,}0118 + 0{,}0125)^2 + \left( 0{,}06 + \frac{0{,}08}{1{,}028} \right)^2}} =$$

$$= 1570 \text{ } a.$$

Диаметр круга вторичного тока

$$D = I''_{2\text{к}i} = \frac{U_1}{x''_{\text{к}}} = \frac{220}{0{,}145} = 1520 \text{ } a.$$

11. Аналитическая проверка проектного задания:
а) максимальный момент

$$M_{max} = \frac{3U_1^2}{2x_к''} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 0{,}145} = 500 \cdot 10^3 \text{ синхронных вт};$$

$$\frac{M_{max}}{M_N} = \frac{500}{155} = 3{,}23 \text{ (задано 3,2)};$$

$$\text{б) } (\cos\varphi)_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2x_к''}{x_m}} = \frac{1}{1 + 2\frac{0{,}145}{2{,}84}} = 0{,}907;$$

$$\text{в) } \cos\varphi_N = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_0}{I_{a1}} + \frac{I_{a1}}{I_{2кi}}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{(0{,}299 + 0{,}167)^2 + 1}} = 0{,}906 \text{ (задано 0,9)};$$

г) $\eta = 0{,}925$ (см. выше);
д) скольжение

$$s_N = \frac{p_{Cu2}}{P_{2N}\left(1 + \frac{p_{Cu2}}{P_{2N}}\right)} = \frac{2{,}4}{155\left(1 + \frac{2{,}4}{155}\right)} = 0{,}0153 \text{ (задано 0,02)}.$$

## X. Расчет средней температуры обмотки статора по методу гл. 6 (§ 11-13)

1. Удельные тепловые нагрузки в *вт/см²*:
а) от потерь в меди

$$w_{Cu} = \frac{p_{Cu}}{\frac{1}{2}l_{w1}\pi D} = \frac{2810}{100 \cdot \pi 38} = 0{,}236;$$

б) от потерь в железе

$$w_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{\pi D l} = \frac{3640}{\pi \cdot 38 \cdot 41{,}5} = 0{,}735;$$

в) изоляции

$$w_i = w_{Cu}\frac{t_1}{\Pi_1} = 0{,}236\frac{1{,}99}{9{,}56} = 0{,}0491,$$

где $\Pi_1$ — периметр паза; для открытого паза $\Pi_1 = 2(h_{п1} + b_{п1}) = 2(3{,}96 + 0{,}82) = 9{,}56$ *см*.

2. Превышение температуры охлаждающего воздуха принимаем $\Delta\theta_a = 25°C$.
3. Расход воздуха

$$V_a = \frac{\Sigma p}{1{,}1\Delta\theta_a} = \frac{12{,}59}{1{,}1 \cdot 25} = 0{,}458 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

4. Удельная теплоотдача в *вт/см²°С*:
а) в зазор

$$\alpha_\delta = 0{,}0028(1 + \sqrt{0{,}5v_a}) = 0{,}0028(1 + \sqrt{0{,}5 \cdot 30}) = 0{,}0136;$$

б) со спинки статора

$$\alpha_j = 0{,}0028(1 + \sqrt{0{,}25v_a}) = 0{,}0028(1 + \sqrt{0{,}25 \cdot 30}) = 0{,}0105;$$

в) в каналы

$$\alpha_s = 0{,}0016(1 + 1{,}4\sqrt{v_s}) = 0{,}0016(1 + 1{,}4\sqrt{6{,}87}) = 0{,}00748,$$

где скорость воздуха в каналах

$$v_s = \frac{V_a}{\pi(D + h_{п1})n_s b_s} = \frac{0{,}458}{\pi(0{,}38 + 0{,}0396) \cdot 5 \cdot 0{,}01} = 6{,}87 \text{ м/сек};$$



г) от железа статора

$$\alpha_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l}\left(\alpha_\delta\frac{b_{z1}}{t_1} + \alpha_j\frac{D_j}{D} + \frac{\alpha_s}{1 + 16{,}7l'\alpha_s}\frac{0{,}7\tau}{l'}\right) =$$

$$= \frac{33{,}6}{41{,}5}\left(0{,}0136\frac{1{,}59}{1{,}99} + 0{,}0105\frac{56}{58} + \frac{0{,}00748}{1 + 16{,}7 \cdot 6{,}1 \cdot 0{,}00748}\frac{0{,}7 \cdot 30}{6{,}1}\right) = 0{,}0332.$$

5. Условное превышение температуры в активной части

$$\theta_1' = \frac{w_{Cu} + w_{Fe}}{\alpha_{Fe}} + \frac{w_i}{k_i}\Delta_i + 0{,}5\,\Delta\theta_a =$$

$$= \frac{0{,}236 + 0{,}735}{0{,}0332} + \frac{0{,}0491}{0{,}0011}0{,}1 + 0{,}5 \cdot 25 = 46{,}2,$$

где $k_i = 0{,}0011$ *вт/см°С*; $\Delta_i = 0{,}1$ *см*.

6. Условное превышение температуры в лобовой части

$$\theta_1'' = \frac{w_{Cu}}{\alpha_л}\frac{t_1}{k_0\Pi} + \frac{w_i}{k_i}\Delta_i + 0{,}25 \cdot \Delta\theta_a,$$

где $k_0$ — коэффициент обдуваемости, принят равный 0,7;

$$\alpha_л = 0{,}00167(1 + \sqrt{0{,}45v_a}) = 0{,}00167(1 + \sqrt{0{,}45 \cdot 30}) = 0{,}0078;$$

$$\theta_1'' = \frac{0{,}236}{0{,}0078}\frac{1{,}99}{0{,}7 \cdot 9{,}56} + \frac{0{,}0491}{0{,}0011} \cdot 0{,}1 + 0{,}25 \cdot 25 = 19{,}72.$$

7. Среднее превышение температуры

$$\theta_{ср} = \frac{\theta_1'l + \theta_1''l_л}{l + l_л} = \frac{46{,}2 \cdot 41{,}5 + 19{,}72 \cdot 58{,}5}{100} = 19{,}6 + 11{,}5 = 31{,}1°C.$$

Средняя температура

$$\theta^0_{ср} = \theta_{ср} + \theta^0_{вх} = 31{,}1 + 35 = 66{,}1°C.$$

Машина имеет значительный тепловой запас.

## *Пример 3*

### Расчет двигателя с короткозамкнутым ротором (нормальная клетка) (§ 11-2—§ 11-16)

(Статор и воздушный зазор те же, что и в примере 2)*
1. Дополнения к проектному заданию примера 2:

а) кратность пускового момента $M_п = \frac{M_п}{M_N} = 0{,}8$;

б) кратность пускового тока $I_п = \frac{I_п}{I_N} = 7$;

в) нормальное скольжение $s_N = 0{,}015$.
2. Число пазов ротора, согласно табл. 66, принимаем равным $Z_2 = 48$.
3. Электродвижущая сила на фазу ротора

$$E_{20} = E_{10}\frac{w_2k_w}{w_1k_{w1}} = 211\frac{0{,}5 \cdot 1}{20 \cdot 0{,}9} = 5{,}8 \text{ в},$$

где $w_2 = 0{,}5$; $k_{w2} = 1$; $w_1 = 20$; $k_{w1} = 0{,}91$; $E_{10} = 211$ *в*.

4. Ток в стержне приближенно, если пренебречь потерями,

$$I_c = \frac{P_2}{Z_2E_{20}(1 - s_N)} = \frac{155 \cdot 10^3}{48 \cdot 5{,}8(1 - 0{,}015)} = 565 \text{ а}.$$

* В примерах 3—5 даются только дополнительные расчеты.

5. Ток в кольце

$$I_л = \frac{I_c}{2\sin\frac{p\pi}{Z_2}} = \frac{565}{2\sin\frac{2\cdot 180}{48}} = 2160\ a.$$

6. Активное сопротивление (требуемое)

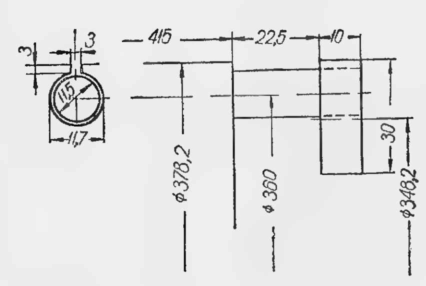
$$r_2' = \frac{s_N E_{10}}{I'_{2N}} = \frac{0{,}015\cdot 211}{249} = 0{,}0127\ ом,$$

где

$$I'_{2N} = I_c\frac{m_2 w_2 k_{w2}}{m_1 w_1 k_{w1}} = 565\,\frac{48\cdot 0{,}5\cdot 1}{3\cdot 20\cdot 0{,}91} = 249\ a.$$

7. Сечение стержня (приближенно)

$$q_c = \frac{\rho_{75}\, l_c\,(1 + k_л)\,k}{r_2'}.$$




Выбираем медный стержень (рис. 237):

$$\rho_{15} = 0{,}0175;\quad \rho_{75} = 1{,}24\cdot 0{,}0175 = 0{,}0217\ ом\,\frac{мм^2}{м};\ (2{,}17\cdot 10^{-6}\ омсм).$$

Из конструктивного эскиза (рис. 237) принимаем длину стержней $l_c = 46$ *см* и диаметр кольца $D_л = 34{,}82$ *см*. Тогда

$$k_л = \frac{D_л}{l_c p} = \frac{34{,}82}{46\cdot 2} = 0{,}378;$$

Рис. 237. Конструкция клетки ротора.

$$k = \frac{4m_1(w_1 k_{w1})^2}{Z_2} = \frac{4\cdot 3\,(20\cdot 0.91)^2}{48} = 82{,}5;$$

$$q_c = \frac{2{,}17\cdot 10^{-6}\cdot 46\,(1 + 0{,}378)\cdot 82{,}5}{0{,}0127} = 0{,}9\ см^2\ (90\ мм^2).$$

Выбираем стержень ⌀ 11,5 *мм*, что соответствует $q_c = 104$ *мм*².

Сопротивление стержня

$$r_c = \rho_{75}\frac{l_c}{q_c} = 0{,}0217\,\frac{0{,}46}{104} = 9{,}6\cdot 10^{-5}\ ом.$$

Плотность тока

$$s_c = \frac{I_c}{q_c} = \frac{565}{104} = 5{,}42\ a/мм^2.$$

8. Сопротивление кольца, приведенное к стержню,

$$\frac{r_л}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_2}} = r_c k_л = 9{,}6\cdot 10^{-5}\cdot 0{,}378 = 3{,}63\cdot 10^{-5}\ ом;$$

$$r_л = 3{,}63\cdot 10^{-5}\cdot 2\sin^2 7{,}5^\circ = 12{,}4\cdot 10^{-7}\ ом.$$

9. Сечение кольца

$$q_л = \rho_{75}\frac{l_л}{r_л} = 0{,}0217\,\frac{0{,}0228\cdot 10^7}{12{,}4} = 398\ мм^2,$$

где

$$l_л = \frac{\pi D_л}{Z_2} = \frac{\pi\cdot 34{,}82}{48} = 2{,}28\ см.$$



Проверяем плотность тока

$$s_л = \frac{I_л}{q_л} = \frac{2160}{398} = 5{,}43\ a/мм^2.$$

Принимаем медное кольцо

$$q_л = a\times b = 30\times 10 = 300\ мм^2;$$

$$s_л = \frac{2160}{300} = 7{,}2\ a/мм^2.$$

10. Сопротивление кольца $r_л = 0{,}0217\,\frac{2{,}28\cdot 10^{-2}}{300} = 16{,}5\cdot 10^{-7}$ *ом*.

Приведенное вторичное сопротивление

$$r_2' = k\left(r_c + \frac{r_л}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_2}}\right) = 82{,}5\left(9{,}6\cdot 10^{-5} + \frac{16{,}5\cdot 10^{-7}}{0{,}034}\right) = 0{,}0119\ ом.$$

11 Определение реактивности рассеяния:

а) пазовая проводимость (эскиз паза см. рис. 237)

$$\lambda_{п2} = 0{,}623 + \frac{h_0}{b_0} = 0{,}623 + \frac{0{,}3}{0{,}3} = 1{,}643;$$

б) проводимость лобовой части

$$\lambda_{л2} = (0{,}08 \div 0{,}1)\,\frac{Z_2}{2p}\cdot\frac{\tau}{l_i} = 0{,}09\,\frac{48}{4}\cdot\frac{30}{39} = 0{,}82;$$

в) дифференциальное рассеяние

$$\lambda_{\delta 2} = \frac{Z_2}{2\pi^2 p}\,\frac{\tau}{\delta^2}\,\sigma_{\delta 2} = \frac{48}{2\cdot\pi^2\cdot 2}\,\frac{30}{0{,}111}\cdot 0{,}0057 = 1{,}87;$$

$$\Sigma\lambda = \lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2} = 1{,}623 + 0{,}82 + 1{,}87 = 4{,}313;$$

$$x_2' = 2\pi\mu_0 f_1\, l_i\,\Sigma\lambda\, k = 2\pi\cdot 1{,}26\cdot 10^{-8}\cdot 50\cdot 39\cdot 4{,}313\cdot 82{,}5 = 0{,}0552\ ом.$$

12. Аналитическая проверка проектного задания:

а) пусковой ток принимаем приближенно:

$$I_1 = I_2'(1 + \sigma_2);\quad \sigma_2 = 0{,}0282\ (\text{пример 2, IX}),$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'\cdot c_1)^2 + (x_1 + x_2'\cdot c_1)^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0{,}0118 + 0{,}0119\cdot 1{,}02)^2 + (0{,}06 + 0{,}0552\cdot 1{,}02)^2}} = 1850\ a,$$

где $c_1 = (1 + \sigma_1) = 1{,}02$ (пример 2, IX);

б) кратность пускового тока

$$\frac{I_п}{I_N} = \frac{1850\cdot 1{,}0282}{282} = 6{,}75;$$

в) кратность пускового момента

$$\frac{M_п}{M_N} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{P_N} = \frac{3\cdot 1850^2\cdot 1{,}19\cdot 10^{-2}}{155\cdot 10^3} = 0{,}79;$$

г) кратность максимального момента

$$\frac{M_{max}}{M_N} = \frac{610}{155} = 3{,}94,$$

где

$$M_{\max} = \frac{3U^2}{2x''_к} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot (0{,}0615 + 0{,}0575)} = 610 \cdot 10^3 \ вт;$$

$$x''_к = x_1c_1 + x'_2c_1^2 = 0{,}06 \cdot 1{,}02 + 0{,}0552 \cdot 1{,}02^2 = 0{,}0615 + 0{,}0575 = 0{,}119;$$

д) к. п. д. (все потери, кроме $p_{Cu2}$, определены в примере 2)

$$(p_{Cu2} = 3\,(I'_{2N})^2\, r'_2 = 3 \cdot 249^2 \cdot 0{,}0119 = 2{,}210 \ вт; \ \ \Sigma p = 12{,}4 \ квт)$$

$$\eta_N = \frac{P_{2N}}{P_{2N} + \Sigma p} = \frac{155}{155 + 12{,}4} = 0{,}926 \ (\text{задано } 0{,}925);$$

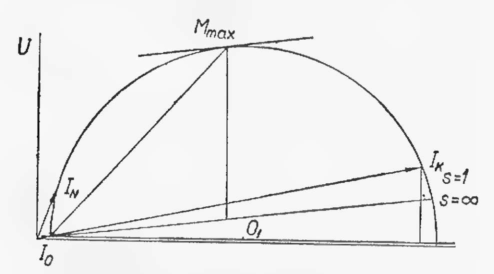



Рис. 238. Круговая диаграмма.

е) скольжение

$$s_N = \frac{p_{Cu2}}{P_{2N}\left(1 + \frac{p_{Cu2}}{P_{2N}}\right)} = \frac{2{,}21}{155\left(1 + \frac{2{,}21}{155}\right)} = 0{,}0141 \ (\text{задано } 0{,}015);$$

ж) $$(\cos\varphi)_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2x''_к}{x_m}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 0{,}119}{2{,}84}} = 0{,}922;$$

з) $$\cos\varphi_N = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_0}{I_{a1}} + \frac{I_{a1}}{I''_{2кi}}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{76}{254} + \frac{254}{1850}\right)^2 + 1}} = 0{,}917,$$

где

$$I'_{2кi} = \frac{U}{x''_к} = \frac{220}{0{,}119} = 1850 \ а.$$

Круговая диаграмма двигателя представлена на рис. 238.

13. Нагрев ротора при продолжительной работе. Перепад температуры обмотки над охлаждающей средой (гл. 6)

$$\theta_1 = \frac{p_1 + k_{12}p_2}{\Lambda'_1},$$

где $k_{12}$ принимаем (с запасом), равным единице;

$$p_1 = p_{Cu_2} = m_1 I'^2_2 r'_2 = 3 \cdot 249^2 \cdot 0{,}0119 = 2210 \ вт;$$

$p_2$ — принимаем равным пульсационным потерям в зубцах ротора (см. пример 2):

$$p_2 = p_{п_2} = 1460 \ вт.$$

Эквивалентная проводимость, если пренебречь тепловым сопротивлением воздушного промежутка между стержнем и железом ротора,

$$\Lambda'_1 \approx \alpha_\delta S_\delta + \alpha_л S_л = 0{,}0136 \cdot 4930 + 0{,}0131 \cdot 1840 = 67 + 24{,}1 = 91{,}1 \ вт/°С,$$



где

$$S_\delta = \pi D l = \pi \cdot 37{,}82 \cdot 41{,}5 = 4930 \ см^2;$$

$$S_л = 4\pi D_л (a + b) = 4\pi \cdot 34{,}8\,(1{,}2 + 3) = 1840 \ см^2;$$

$$\alpha_\delta = 0{,}0136 \ вт/см^2 °С;$$

$$\alpha_л = 0{,}0028\,(1 + \sqrt{0{,}45 v_a}) = 0{,}0028 \times (1 + \sqrt{0{,}45 \cdot 30}) = 0{,}0131;$$

$$\theta_1 = \frac{2210 + 1460}{91{,}1} = 40{,}3° \ С.$$

Превышение над входящим воздухом при подогреве воздуха $\theta_{гор} - \theta_{хол} = 25°$

$$\theta_{Cu} = \theta_1 + \theta_a = 40{,}3 + 12{,}5 = 52{,}8° \ С.$$

Температура меди ротора

$$\theta^{\circ}_{Cu} = 52{,}8 + 35 = 87{,}8° \ С.$$

14. Нагрев ротора при пуске. Для расчета нагрева ротора при пуске согласно гл. 6 необходимо знать маховой момент двигателя и привода и иметь характеристику внешнего момента сопротивления $M_в$ в функции скольжения (рис. 73), откуда можно определить средний ускоряющий момент $\Delta M = M - M_в$. В данном расчете задаемся этими величинами для примера.

Маховой момент ротора

$$GD_r^2 \approx \frac{1}{8}\pi D_r^4 l \gamma_{Fe} \cdot 10^{-4} \ кгм^2 =$$

$$= \frac{1}{8}\pi\,(37{,}82)^4 \cdot 41{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4} = 26{,}3 \ кгм^2.$$

Полный маховой момент

$$GD^2 = GD_r^2\,(1 + k_{пр}),$$

где $k_{пр}$ — отношение махового момента привода (приведенного к валу двигателя) к маховому моменту двигателя. Для примера задаемся $k_{пр} = 1$, тогда $GD^2 = 52{,}6$ $кгм^2$.

Постоянная инерции, отнесенная к подводимым *ква*,

$$T_i = \frac{2{,}74\, GD^2 n^2\, 10^{-6}}{P_N \ (ква)} = \frac{2{,}74 \cdot 52{,}6 \cdot 1500^2 \cdot 10^{-6}}{186} = 1{,}75 \ сек.$$

Определяем теплоемкость пусковой клетки с кольцами.

Вес клетки

$$G_{кл} = (Z_2 q_c l_c + 2\pi D_л q)\gamma_{Cu} =$$

$$= (48 \cdot 1{,}04 \cdot 46 + 2 \cdot 34{,}82 \cdot 3)\, 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 26{,}4 \ кг.$$

Удельная и полная теплоемкость меди

$$c_{Cu} = 388 \ вт \cdot сек/кг° С; \ \ C = c_{Cu} G_{кл} = 388 \cdot 26{,}4 = 10\,200 \ дж/° С.$$

Подогрев клетки при одном пуске без учета теплоотдачи

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} P_N T_i \left(\frac{M}{\Delta M}\right)_{ср} \frac{1}{C} = \frac{1}{2} 186 \cdot 10^3 \cdot 1{,}75 \cdot 2 \cdot \frac{1}{10\,200} = 31{,}7° С.$$

При этом среднее отношение ускоряющего момента $\Delta M = M - M_в$ к моменту двигателя $M$ принято равным 0,5.

Время пуска

$$t_п = T_i \frac{1}{\Delta M} = 1{,}75 \cdot \frac{1}{0{,}5} = 3{,}5 \ сек.$$

Как видно, даже при таком малом отношении $\frac{\Delta M}{M_N}$ время пуска намного меньше минимальной постоянной времени клетки

$$T_{\min} = \frac{C}{\Lambda_1'} = \frac{10\,200}{91{,}1} = 112 \text{ сек.}$$

и, следовательно, расчет нагрева клетки можно производить без учета теплоотдачи.

Подогрев клетки при одном пуске по другому методу (гл. 6). Так как $\Delta\theta = \frac{k_э^2 p_п t_п}{T_{\min}\Lambda_1'}$; $p_п = 3I_2'^2 r_2'$, $k_э$ по [92] равна 0,9, то нагрев ротора за один пуск

$$\Delta\theta = \frac{0{,}9^2 \cdot 124 \cdot 10^3 \cdot 3{,}5}{10\,200} = 34{,}5°\text{C}.$$

Нагрев статора при пуске будет меньше нагрева ротора.

## *Пример 4*

### Расчет короткозамкнутого ротора с глубоким пазом (§ 11-17)

(стержни и кольца медные)

Статор, воздушный зазор и число пазов ротора те же, что и в примере 2 и 3.

1. Дополнения к проектному заданию примера 2:

а) кратность пускового момента 1,5;

б) кратность максимального момента 2,5;

в) кратность пускового тока 6;

г) номинальное скольжение $s_N = 0{,}015$.

2. Величины $E_{o2}$, $I_с$, $I_л$, $I_{2N}$ и $r_2$ такие же, как и в примере 3.

3. Принимаем из конструктивного эскиза (рис. 239) $l_с = 46$ *см* и $D_л = 34{,}82$ *см* и из условий прочности кольца задаемся сечением кольца $a \times b = 3{,}0 \times 1{,}2 = 3{,}60$ *см²*.

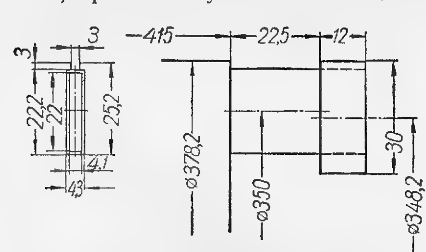



Рис. 239. Конструкция клетки.

4. Определяем требуемое реактивное сопротивление стержня ротора без учета вытеснения тока.

Задаваясь кратностью моментов $\frac{M_{\max}}{M_N}$, получаем по § 11-18

$$x_{п2}' = x_\sigma \cdot \left(\frac{M_{\max 0}}{M_{\max}} - 1\right),$$

где $x_\sigma = x_1 + x_{\delta 2}' + x_{п.о}' + x_{л2}'$; $x_1 = 0{,}06$ (см. пример 2).

Реактивное сопротивление от дифференциального рассеяния $x_\delta'$ осталось неизменным и равным его значению для ротора с нормальной клеткой (см. выше), так как $Z_2$ осталось неизменным

$$x_{\delta 2}' = 0{,}0552\,\frac{\lambda_{\delta 2}}{\xi\lambda} = 0{,}0552\,\frac{1{,}87}{4{,}313} = 0{,}0239 \text{ ом}.$$



Реактивное сопротивление от рассеяния пазового открытия шириной 0,3 *см* и высотой 0,3 *см*:

$$\lambda_{п.о} = \frac{h_0}{b_0} = \frac{0{,}3}{0{,}3} = 1;\ k = 82{,}5 \text{ (пример 3)};$$

$$x_{п.о}' = 2\pi\mu_0 l i f_1 \lambda_{п.о} k = 2\pi \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 39 \cdot 1 \cdot 82{,}5 = 1{,}27 \cdot 10^{-2} \text{ ом}.$$

Реактивное сопротивление от рассеяния лобовой части $\lambda_{л2} = 0{,}82$ (пример 3)

$$x_{л2}' = 2\pi\mu_0 f_1 l i \lambda_{л2} k = 2\pi \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 39 \cdot 0{,}82 \cdot 82{,}5 = 1{,}01 \cdot 10^{-2} \text{ ом}.$$

Суммарное сопротивление без пазовой части

$$x_\sigma = 0{,}06 + 0{,}0239 + 0{,}0127 + 0{,}0101 = 0{,}1067 \text{ ом};$$

$$M_{\max 0} = \frac{mU^2}{2x_\sigma c} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 0{,}1067 \cdot 1{,}1} = 617 \cdot 10^3 \text{ синхронных вт},$$

где $c$ — общий коэффициент рассеяния, равный $(1 + \sigma_1)(1 + \sigma_2) = 1 + \sigma$, принимаем равным 1,1;

$$\frac{M_{\max 0}}{M_N} = \frac{617 \cdot 10^3}{155 \cdot 10^3} = 3{,}98 \text{ (задано 2,5)};$$

Аналогично (186) находим желаемую величину $x_{п2}'$

$$x_{п2}' = 0{,}1067\left(\frac{3{,}98}{2{,}5} - 1\right) = 0{,}063.$$

5. Определяем требуемое активное и реактивное сопротивление стержня ротора при $s = 1$ из учета задаваемой величины пускового тока и пускового момента, а именно:

$$r_2'(1) = \frac{P_п}{m I_{п2}'^2} = \frac{155 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5}{3\,(6 \cdot 282)^2} = 0{,}027 \text{ ом};$$

$$r_с'(1) \approx r_2'(1 - k_л) = 0{,}027\,(1 - 0{,}38) = 0{,}0167,$$

$$\text{где } k_л = \frac{D\rho}{l_с \rho\, \rho_с} = \frac{34{,}8}{46{,}2} = 0{,}38.$$

Реактивное сопротивление пазовой части стержня

$$x_{п2}'(1) = \sqrt{z_к^2 - [r_1 + r_2'(1)]^2} - x_\sigma =$$

$$= \sqrt{0{,}13^2 - [0{,}0118 + 0{,}027]^2} - 0{,}107 = 0{,}017,$$

где $z_к = \frac{U}{I_{п2}'} = \frac{220}{1690} = 0{,}13$ *ом*.

Отсюда получаем отношение

$$k_{xn}' = \frac{x_{п2}'(1)}{x_{п2}'} = \frac{\lambda_п^1}{\lambda_п} = \frac{0{,}017}{0{,}063} = 0{,}270.$$

6. Сечение стержня

$$q_с = \frac{\rho_{75} l_с (1 + k_л)\,k}{r_2'} =$$

$$= \frac{1{,}24 \cdot 0{,}46\,(1 + 0{,}38)\,82{,}5}{57 \cdot 0{,}0127} = 86{,}7 \text{ мм}^2,$$

где $r_2' = r_2'(s_N) = 0{,}0127$ (пример 3).

Выбираем медный стержень с размерами

$$22 \times 4{,}1 = 90{,}8 \text{ мм}^2,$$

40*

при этом сопротивление стержня

$$r_c = \rho_{75}\frac{l_c}{q_c} = \frac{1,24 \cdot 0,46}{57 \cdot 90,8} = 0,00011 \text{ ом};$$

$$r'_c = r_c k = 0,00011 \cdot 82,5 = 0,0091 \text{ ом}$$

и плотность тока в стержне

$$s_c = \frac{I_c}{q_c} = \frac{565}{90,8} = 6,23 \text{ а/мм}^2.$$

7. Сечение и активное сопротивление кольца

$$\frac{r''_л}{2\sin\frac{\pi p}{Z_2}} \approx r'_c k_л = 0,0091 \cdot 0,38 = 0,00347;$$

$$r'_л = 0,00347 \cdot 2\sin^2 7,5^\circ = 11,7 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$q_л = \rho_{75}\frac{l_л}{r'_л}k = \frac{1,24 \cdot 0,0228 \cdot 82,5}{57 \cdot 11,7 \cdot 10^{-5}} = 349 \text{ мм}^2$$

где $l_л = \frac{\pi D_л}{Z_2} = \frac{\pi\, 34,82}{48} = 2,28$ см.

Выбираем кольцо с размерами

$$q_л = 30 \times 12 = 360 \text{ мм}^2;$$

$$\frac{r'_л}{2\sin^2\alpha_1} = \frac{1,24 \cdot 2,28 \cdot 10^{-2} \cdot 82,5}{57 \cdot 360 \cdot 2\,(0,13)^2} = 0,00336 \text{ ом},$$

где

$$\alpha_1 = \frac{\pi p}{Z_2} = \frac{180 \cdot 2}{48} = 7,5^\circ.$$

Плотность тока в кольце

$$s = \frac{2160}{360} = 6 \text{ а/мм}^2.$$

Окончательно

$$r'_2 = r'_c + \frac{r'_л}{2\sin^2\alpha_1} = 0,0091 + 0,00336 = 0,0125 \text{ ом}.$$

8. Найдем реактивность рассеяния без учета вытеснения тока. Размеры паза (рис. 239):

$$h'_{п2} = 2,22 \text{ см}; \; b_{п2} = 0,43 \text{ см}; \; h_{o2} = 0,3 \text{ см}; \; b_{o2} = 0,3 \text{ см};$$

$$b_{z22} = b_{z2ср} = t_2\frac{D_r - h_{п2}}{Z_2} - b_{п2} = 2,48\,\frac{37,82 - 2,52}{48} - 4,3 = 1,4 \text{ см}.$$

Пазовая проводимость

$$\lambda_{п2} = \left(\frac{h'_{п2}}{3b_{п2}} + \frac{h_{o2}}{b'_{o2}}\right) = \left(\frac{2,22}{3 \cdot 0,43} + \frac{0,3}{0,3}\right) = 2,72.$$

Проводимость лобовой части равна 0,82 (пример 3).
Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\delta 2} = \frac{Z_2}{2\pi^2 p}\frac{\tau}{\delta'}\sigma_{\delta 2} = \frac{48 \cdot 30}{2 \cdot \pi^2 \cdot 2 \cdot 0,111} \cdot 0,0057 = 1,875,$$



где $\sigma_{\delta 2} = 0,0057$ (см. пример 3);

$$\Sigma\lambda = \lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2} = 2,72 + 0,82 + 1,875 = 5,415;$$

$$x'_2 = 2\pi\mu_0 f_1 l_i \Sigma\lambda k = 2\pi \cdot 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 39 \cdot 5,415 \cdot 82,5 = 0,069 \text{ ом}.$$

9. Параметры с учетом вытеснения тока (§ 11-17):

а) активное сопротивление в функции $s$

$$r'_2(s) = k_{rп}(s)\,r'_c + \frac{r''_л}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_2}},$$

где $k_{rп}(s) = \varphi(\xi)$; $\xi = \xi(s) = \xi(1)\sqrt{s}$;

б) активное сопротивление при $s = 1$

$$r'_г = k_{rп}(1)\,r'_c + \frac{r'_л}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_2}} = 2,22 \cdot 0,0091 + 0,00336 = 0,0236 \text{ ом};$$

$$k_{rп} = \varphi(\xi); \; \xi(1) = a h'_{п2}; \; a \approx 1;$$

$$\xi(1) = 1 \cdot 2,22 = 2,22; \quad \varphi(\xi) = \xi = 2,22; \; k_{rп} = 2,22;$$

в) реактивное сопротивление в функции $s$

$$x'_2(s) = 2\pi\mu_0 f_1 l_i\,[\lambda_{п2}k_{xп}(s) + \lambda_{п2} + \lambda_{\delta 2}] \cdot k, \text{ где } k_{xп} \text{ по гл. 4};$$

г) реактивное сопротивление при $s = 1$

$$x'_2(1) = 2\pi\mu_0 f_1 l_i\,[\lambda_{п2}k_{xп}(1) + \lambda_{л2}\lambda_{\delta 2}] \cdot k.$$

При $\xi = 2,22$ по рис. 23 $k_{xп}(1) = 0,7$. Тогда

$$x'_2(1) = 2\pi \cdot 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 39\,(2,72 \cdot 0,7 + 0,82 + 1,875) \cdot 82,5 = 0,0586 \text{ ом}.$$

10. Пусковой ток (при $c_1 = 1$)

$$I'_{2п} = \frac{U_1}{\sqrt{[r_1 + r'_2(1)]^2 + [x_1 + x'_2(1)]^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{(0,0118 + 0,0236)^2 + (0,06 + 0,0586)^2}} = 1775 \text{ а};$$

$$\frac{I'_{2п}}{I_N} = \frac{1775}{282} = 6,3.$$

11. Относительное значение пускового момента

$$\frac{M_п}{M_N} = \frac{m_1 I_2'^2 r'_2(1)}{P_N} = \frac{3 \cdot 1775^2 \cdot 2,36 \cdot 10^{-2}}{155\,000} = 1,44 \text{ (задано 1,5)}.$$

Таким образом, полученный момент близок заданному.

12. Для построения пусковой характеристики $M = f(s)$ или геометрического места тока вычисляем $x'_2(s)$ и $\frac{r'_2(s)}{s}$, после чего определяем ток в функции $s$

$$I'_2(s) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2(s) \cdot c_1}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2(s) \cdot c_1)^2}},$$

где

$$c_1 = 1 + \sigma_1, \quad \sigma_1 = \frac{x_1}{x_m},$$

и момент

$$M(s) = m \cdot [I'_2(s)]^2 \cdot \frac{r'_2(s)}{s} \text{ синхронных вт}.$$

Кривая геометрического места токов двигателя приведена на рис. 240.

13. Учет влияния насыщения при пуске по гл. 4.

$$x'_{2н} = x'_2 \frac{\lambda_{п2н} k_{хп} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2н}}{\lambda_{п2} k_{хп} + \lambda_{л2} + \lambda_{\delta 2}}.$$

Выше были определены:

$$x'_{2\,(s=1)} = 0{,}069 \text{ ом}; \ \lambda_{л2} = 0{,}82; \ \lambda_{п2} = 2{,}72; \ \lambda_{\delta 2} = 1{,}875$$

(из рис. 23 $k_{хп} = 0{,}7$);

$$\lambda_{п2н} = \frac{h_{o2}}{b'_{o2}} + \frac{1}{3}\frac{h'_{п2}}{b'_{п2}} = \frac{0{,}3}{0{,}487} + \frac{2{,}22}{3 \cdot 0{,}617} = 1{,}816;$$

$$h_{o2} = 0{,}3 \text{ см}; \ h'_{п2} = 2{,}22 \text{ см}; \ b'_{o2} = b_{o2} + \frac{b_{z22}}{\mu'}; \ b'_{п2} = b_{п2}\frac{b_{z22}}{\mu'};$$

$$b_{o2} = 0{,}3 \text{ см}; \ b_{п2} = 0{,}43 \text{ см}; \ b_{z22} = 1{,}4 \text{ см};$$

$$\mu' = \frac{B_{zк}}{\mu_0 (H_{zк} + A_N I_к)} = \frac{2{,}02 \cdot 10^{-4}}{1{,}26 \cdot 10^{-8}(300 + 284 \cdot 6{,}5)} = 7{,}5$$

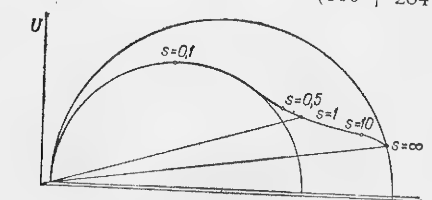



Рис. 240. Геометрическое место токов двигателя.

(по кривым намагничивания $B_{zк} \approx 2 \cdot 10^{-4}$; $H_{zк} = 300$, задаемся кратностью тока 6,5):

$$b'_{o2} = 0{,}3 + \frac{1{,}4}{7{,}5} = 0{,}487; \ b'_{п2} = 0{,}43 + \frac{1{,}4}{7{,}5} = 0{,}617;$$

Принимая по VI примера 2 $k_н = 1{,}21$ $\lambda_{\delta 2н} = \frac{\lambda_{\delta 2}}{k_н} = \frac{1{,}875}{1{,}21} = 1{,}55.$

Окончательно

$$x'_{2н} = 0{,}069 \frac{1{,}816 \cdot 0{,}7 + 0{,}82 + 1{,}55}{2{,}72 \cdot 0{,}7 + 0{,}82 + 1{,}875} = 0{,}0546 \text{ ом}.$$

Для статора

$$x_{1н} = x_1 \frac{\lambda_{п1н} + \lambda_{л1} + \lambda_{\delta 1н}}{\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{\delta 1}} = 0{,}06 \frac{1{,}667 + 1{,}54 + 0{,}96}{2{,}04 + 1{,}54 + 1{,}16} = 0{,}0528 \text{ ом},$$

где

$$\lambda_{п1н} \approx \lambda_{п1} \frac{b_{п1}}{b'_{п1}} = 2{,}04 \frac{0{,}82}{1} = 1{,}667;$$

$\lambda_{п1}$; $\lambda_{л1}$; $\lambda_{\delta 1}$; $b_{п1}$; $b_{z12}$; $k_н$ см. в примере 2;

$$b'_{п1} = b_{п1} + \frac{b_{z12}}{\mu'} = 0{,}82 + \frac{1{,}38}{7{,}5} = 1; \quad \lambda_{\delta 1н} = \lambda_{\delta 1} \cdot \frac{1}{k_н} = \frac{1{,}16}{1{,}21} = 0{,}96.$$

Пусковой ток

$$I'_{2пн} = \frac{220}{\sqrt{(0{,}0118 + 0{,}0236)^2 + (0{,}0528 + 0{,}0546)^2}} = 1945 \text{ а};$$

$$\frac{I'_{2пн}}{I_N} = \frac{1945}{282} = 6{,}9.$$



Таким образом, с учетом насыщения пусковой ток получается на 10% больше, чем без учета насыщения. (При закрытых пазах ротора пусковой ток может получиться на 50% выше—§ 4-7.)

Проверка ротора на нагрев производится аналогично примеру 3.

14. Аналитическая проверка проектного задания:

а) максимальный момент (без учета вытеснения тока)

$$M_{max} \approx \frac{3U^2}{2x''_к} = \frac{3U^2}{2(x_1 c_1 + x'_2 c_1^2)} = \frac{3 \cdot 220^2}{2(0{,}0615 + 0{,}069 \cdot 1{,}0212^2)} =$$

$= 545 \cdot 10^3$ *синхронных вт*;

$$\frac{M_{max}}{M_N} = \frac{545}{155} = 3{,}52 \text{ (задано 2,5)};$$

б) пусковой ток с учетом вытеснения и насыщения

$$\frac{I_п}{I_N} = 6{,}9 \text{ (задано 6)};$$

в) $\frac{M_п}{M_N} = 1{,}44$ (задано 1,5);

г) коэффициент мощности соответствует заданию (см. пример 3);

д) номинальное скольжение соответствует заданному, так как активное сопротивление ротора рассчитывалось с учетом заданного скольжения $s_N$.

## *Пример 5*

Двигатель с двойной клеткой и вариант фигурного паза (§ 11-2—§ 11-18)

(Статор и воздушный зазор — те же, что и в примере 2.)

Пусковая клетка берется из круглых латунных стержней, рабочая клетка—из медных стержней прямоугольного сечения.

Каждая клетка имеет собственное короткозамыкающее медное кольцо.

Выбор размеров пусковой и рабочей клетки.

1. При заданной кратности моментов

$$\frac{M_п}{M_N} = 1{,}2$$

и кратности токов

$$\frac{I_п}{I_N} = 6$$

определим требуемое активное сопротивление при пуске ($s = 1$)

$$r'_{2\,(s=1)} = \frac{P_п}{m (I'_{2п})^2} = \frac{155 \cdot 10^3 \cdot 1{,}2}{3 \cdot 1690^2} = 0{,}0217 \text{ ом},$$

где $I'_{2п}$ — приведенный пусковой ток вторичной цепи двух клеток

$$I'_{2п} \approx I_{1п} = 6 \cdot 282 = 1690 \text{ а}.$$

Сопротивление

$$z_к = \frac{U}{I_{1п}} = \frac{220}{1690} = 1{,}13 \text{ ом}.$$

2. Согласно эквивалентной схеме рис. 222 реактивное сопротивление

$$x'_{2э\,(s=1)} = \sqrt{z_к^2 - [r_1 + r'_{2\,(s=1)}]^2} - x_\sigma,$$

где $x_\sigma = x_1 + x'_{\delta 2} + x'_{п.о}$; $x_1 = 0{,}06$ *ом* (см. примеры 2, 3, 4).

Реактивное сопротивление от дифференциального рассеяния (см. пример 4) $x'_{\delta 2} = 0{,}0239$ *ом*.

Реактивное сопротивление от рассеяния пазового открытия по § 11-18

$$x'_{п.\,о} = 2\pi\mu_0 f\, l i \lambda_{п.\,о} k = 2\pi \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 39 \cdot 1 \cdot 82{,}5 = 1{,}27 \cdot 10^{-2}\ ом,$$

где $\lambda_{п.\,о} = \frac{h_0}{b_0} = \frac{0{,}3}{0{,}3} = 1$ (при высоте и ширине открытия 0,3 *см*); по примерам 3—4 $k = 82{,}5$.

Суммарное сопротивление без учета стержней

$$x_\sigma = 0{,}06 + 0{,}0239 + 0{,}0127 = 0{,}0966\ ом.$$

Требуемое реактивное сопротивление при пуске

$$x'_{2э\,(s=1)} = \sqrt{0{,}13^2 - (0{,}0118 + 0{,}0217)^2} - 0{,}0966 = 0{,}0286\ ом.$$

3. Определим теперь $r'_2$ и $x'_{2э}$ при малых скольжениях $s_N = 0{,}015$; $E_{20} = 5{,}86\,в$ и

$$r_{2\,(s\to s_N)} = \frac{s_N E_{20}}{I_{2N}} = 0{,}015 \cdot \frac{5{,}8}{565} = 1{,}54 \cdot 10^{-4}\ ом,$$

где $I_{2N}$ — вторичный ток (эффективный в верхнем и нижнем стержне)

$$I_{2N} = \frac{P_{2N}}{Z_2 E_{20}(1 - s_N)} = \frac{155 \cdot 10^3}{48 \cdot 5{,}8\,(1 - 0{,}015)} = 565\ а;$$

$$r'_{2\,(s\to s_N)} = r_{2\,(s\to s_N)} k = 1{,}54 \cdot 10^{-4} \cdot 82{,}5 = 0{,}0127\ ом.$$

Задаемся кратностью моментов $\frac{M_{max}}{M_N} = 2{,}5$. Тогда реактивное сопротивление

$$x_{2эN} = x'_{2\,(s=s_N)} = x_\sigma\left(\frac{M_{max\,o}}{M_{max}} - 1\right) = 0{,}0966\left(\frac{4{,}4}{2{,}5} - 1\right) = 0{,}0735\ ом,$$

где

$$M_{max\,o} \approx \frac{mU^2}{2x_\sigma c} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 0{,}0966 \cdot 1{,}1} = 6{,}83 \cdot 10^5\ синхронных\ вт;$$

$$\frac{M_{max\,o}}{M_N} = \frac{6{,}83}{155} \cdot \frac{10^5}{10^3} = 4{,}4.$$

4. Сопротивление верхнего стержня по формуле (187)

$$r'_в = r'_{2\,(s=1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{x'_{2э}}{r'_2}\right)^2\right]_{s=1} = 0{,}0217 \cdot \left[1 + \left(\frac{0{,}0286}{0{,}0217}\right)^2\right] = 0{,}0594\ ом.$$

Приближенное значение $\alpha = \frac{r'_н}{r'_в}$ равно

$$\alpha = \frac{r'_{2N}}{r'_в - r'_{2N}} = \frac{0{,}0127}{0{,}0594 - 0{,}0127} = 0{,}273;$$

следовательно, приближенные значения параметров нижней клетки *

$$x'_н = x'_{2N}(1 + \alpha)^2 = 0{,}0735\,(1 + 0{,}273)^2 = 0{,}12\ ом;$$

$$r'_н = \alpha r'_в = 0{,}273 \cdot 0{,}0594 \approx 0{,}0165\ ом.$$

5. Из конструктивного эскиза (рис. 241) выбираем кольцо верхней клетки с размерами 30 × 10 = 300 *мм²* и $D_л = 348{,}2$ *мм*.

Проводимость $\lambda_{п.\,в}$ не зависит от диаметра стержня и равна 0,623.

---

* Точные значения $\alpha$, $x_н$ и $r_н$ найдутся после окончательного выбора размера стержней.



6. Проводимость лобовой части пусковой клетки $\lambda_{л.\,в} = 0{,}82$ (пример 3).

7. Согласно (152)

$$x'_в = 2\pi f \mu_0 l i\,(\lambda_{п.\,в} + \lambda_{л.\,в})\,k = 2\pi \cdot 50 \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 39\,(0{,}623 + 0{,}82) \times 82{,}5 = 1{,}83 \cdot 10^{-2}.$$

8. Приближенные значения коэффициентов $\beta$ и $\gamma$:

$$\beta = \frac{x'_н}{r'_н} = \frac{0{,}12}{0{,}0165} = 7{,}2 \text{ и } \gamma = \frac{x'_в}{x'_н} = \frac{0{,}0183}{0{,}12} = 0{,}152.$$

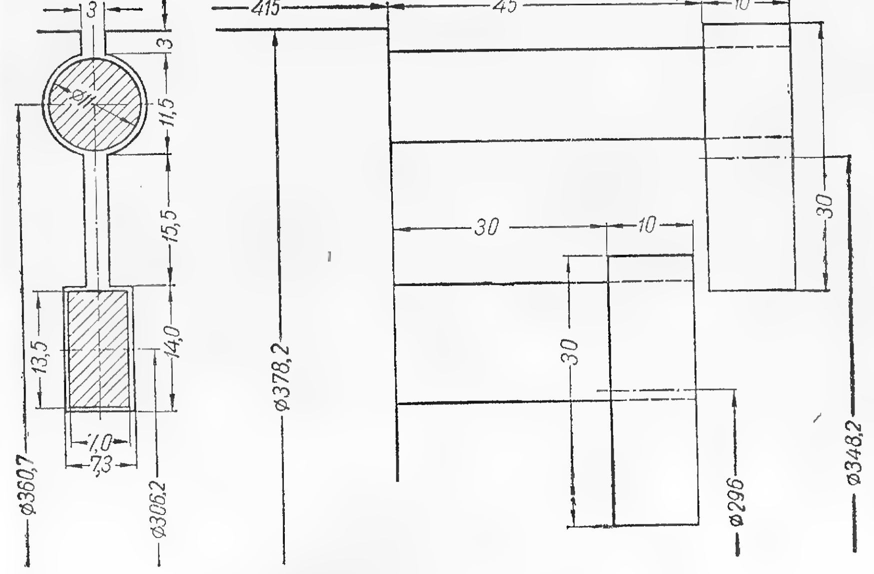



Рис. 241. Конструкция клетки.

9. Уточняем полученные значения $r'_в$, $x'_н$:

$$r'_в = \frac{r'_{2\,(s=1)}}{c_r} = \frac{0{,}0217}{0{,}625} = 0{,}0348\ ом;$$

где

$$c_r \approx \frac{1 + \frac{1}{\gamma} + \beta^2}{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2(1+\gamma)^2} = \frac{1 + 3{,}66 + 52}{(1 + 3{,}66)^2 + 52\,(1 + 0{,}152)^2} = 0{,}625;$$

$$x'_н = \frac{x'_{2э\,(s=1)}}{c_x} = \frac{0{,}0286}{0{,}214} = 0{,}133,$$

где

$$c_x \approx \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2\gamma(1+\gamma)}{1 + \left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2(1+\gamma)^2} = \frac{10{,}34 + 52 \cdot 0{,}152 \cdot (1 + 0{,}152)}{90{,}9} = 0{,}214.$$

10. Выбираем теперь сечение стержня верхней клетки

$$q_{в.\,с} = \frac{\rho_{в.с}\, l_{в.с}\,(1 + k_л)\,k}{r'_в} = \frac{0{,}06 \cdot 0{,}505 \cdot (1 + 0{,}115) \cdot 82{,}5}{0{,}0348} = 80\ мм^2,$$

где

$$k_л = \frac{D_л \rho_л}{l_c \rho_c p} = \frac{34{,}82 \cdot 0{,}02}{50{,}5 \cdot 0{,}06 \cdot 2} = 0{,}115;$$

для латуни

$$\rho = 0{,}06\ \frac{ом \cdot мм^2}{м}.$$

Из условий технологии приварки колец выбираем $l_c = 50{,}5$ *см*

Выбираем стандартный стержень диаметром 11 *мм*, что соответствует

$$q_{в.\,с} = 95{,}2\ мм^2.$$

Точное сопротивление верхнего стержня

$$r'_{в.\,с} = \rho_{в.\,с} \frac{l_{в.\,с}}{q_{в.\,с}} k = 0{,}06 \cdot 1{,}24 \frac{0{,}505}{95{,}2} \cdot 82{,}5 = 0{,}0331\ ом.$$

11. Из уравнений (107) и (110) сопротивления верхнего кольца

$$\frac{r'_{в.\,л}}{2 \sin \frac{2\pi p}{Z^2}} = r'_{в.\,с} k_л = 0{,}0331 \cdot 0{,}115 = 0{,}0038\ ом,$$

$$r'_{в.\,л} = 2 \cdot 0{,}0038 \cdot \sin^2 7{,}5^\circ = 12{,}9 \cdot 10^{-5}\ ом.$$

Сечение кольца

$$q_{в.\,л} = \frac{\rho_{в.\,л} \pi D_{в.\,л} k}{Z_2 r'_{в.\,л}} = \frac{0{,}0217 \cdot \pi \cdot 0{,}3482 \cdot 82{,}5}{48 \cdot 12{,}9 \cdot 10^{-5}} = 318\ мм^2.$$

Вибираем медное кольцо сечением $30 \times 10 = 300\ мм^2$. Сопротивление верхнего кольца

$$r'_{в.\,л} = 12{,}9 \cdot 10^{-5}\ \frac{318}{300} = 13{,}7 \cdot 10^{-5}\ ом.$$

12. Сопротивление верхней клетки

$$r'_в = r'_{в.\,с} + \frac{r'_{в.\,л}}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} = 0{,}0331 + \frac{13{,}7 \cdot 10^{-5}}{2 \sin^2 7{,}5^\circ} = 0{,}037\ ом.$$

13. Расчет сечения стержня рабочей клетки. Из условий технологии принимаем $l_{н.\,с} = 47{,}5$ *см*.

$$q_{н.\,с} = \frac{\rho_{н.\,с} l_{н.\,с}\,(1 + k_{л.\,н})\,k}{r'_н} = \frac{0{,}0217 \cdot 0{,}475\,(1 + 0{,}312) \cdot 82{,}5}{0{,}0165} = 67\ мм^2;$$

$$k_{л.\,н} = \frac{D_{л.\,н}}{l_{с.\,н} p} = \frac{29{,}6}{47{,}5 \cdot 2} = 0{,}312.$$

Принимаем $D_{л.\,н} = 29{,}6$ *см* (по конструктивному эскизу рис. 241). Проверяем плотность тока в рабочем стержне

$$s_{н.\,с} = \frac{I_н}{q_{н.\,с}} = I_{2н} \frac{1}{1 + \alpha} \cdot \frac{1}{q_{н.\,с}} = 565 \frac{1}{1 + 0{,}273} \cdot \frac{1}{67} = 6{,}62\ а/мм^2.$$

Принимаем сечение стержня

$$q_{н.\,с} = 13{,}5 \times 7{,}0 = 94{,}5\ мм^2,$$

тогда плотность тока

$$s_{н.\,с} = 565 \frac{1}{1 + 0{,}273} \cdot \frac{1}{94{,}5} = 4{,}7\ а/мм^2.$$



Точное сопротивление рабочего стержня без учета $k_{rп}(s)$ *

$$r'_{н.\,с} = \rho_{н.\,с} \frac{r_{н.\,с}}{q_{н.\,с}} k = 0{,}0217 \cdot \frac{0{,}475}{94{,}5} \cdot 82{,}5 = 0{,}009\ ом.$$

14. Желательное сопротивление нижнего кольца

$$\frac{r'_{н.\,л}}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} = r'_{н.\,с} \cdot k_{л.\,н} = 0{,}009 \cdot 0{,}312 = 0{,}0028\ ом;$$

$$r'_{н.\,л} = 2 \cdot 0{,}0028 \cdot \sin^2 7{,}5^\circ = 9{,}5 \cdot 10^{-5}\ ом,$$

откуда

$$q_{н.\,л} = \frac{\rho_{н.\,л} \pi D_{н.\,л} k}{Z_2 r'_{н.\,л}} = \frac{0{,}0217 \cdot \pi \cdot 0{,}296 \cdot 82{,}5}{48 \cdot 9{,}5 \cdot 10^{-5}} = 366\ мм^2.$$

Проверяем плотности тока в кольце

$$s_{н.\,л} = \frac{I_{н.\,л}}{q_{н.\,л}} = \frac{1700}{366} = 4{,}65\ а/мм^2,$$

где

$$I_{н.\,л} = \frac{I_{2N}\left(\frac{1}{1+\alpha}\right)}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}} = \frac{565 \cdot \frac{1}{1{,}273}}{2 \sin 7{,}5^\circ} = 1700\ а.$$

Принимаем кольцо с размерами $q_{н.\,л} = 30 \times 10 = 300\ мм^2$, тогда плотность тока

$$s_{н.\,л} = \frac{1700}{300} = 5{,}67\ а/мм^2.$$

15. Окончательно сопротивление нижнего кольца

$$r'_{н.\,л} = 9{,}5 \cdot 10^{-5} \frac{366}{300} = 11{,}6 \cdot 10^{-5}\ ом.$$

16. Окончательное сопротивление нижней клетки (без учета $k_{rп}$)

$$r'_н = r'_{н.\,с} + \frac{r'_{н.\,л}}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}} = 0{,}009 + \frac{11{,}6 \cdot 10^{-5}}{2 \sin^2 7{,}5^\circ} = 0{,}0124\ ом.$$

17. По формуле (151) определяем (без учета $k_{xп}(s)$ **)

$$x'_н = 2\pi\mu_0 l i f\,(\lambda_{п.\,н} + \lambda_{л.\,н})\,k,$$

где

$$\lambda_{п.\,н} = \left(\frac{1}{3}\frac{h_1}{b_п} + \frac{h_2}{b_2}\right) = \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{1{,}4}{0{,}73} + \frac{1{,}55}{0{,}25}\right) = 6{,}85;$$

$$\lambda_{л.\,н} = \lambda_{л.\,в} = 0{,}82\ (\text{по п. } 6);$$

$$x'_н = 2\pi \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 39 \cdot 50\,(6{,}85 + 0{,}82) \cdot 82{,}5 = 0{,}1\ ом.$$

18. Точные значения $c_r$ и $c_x$.

$$\alpha = \frac{r'_н}{r'_в} = \frac{0{,}0124}{0{,}037} = 0{,}336; \quad \beta = \frac{x'_н}{r'_н} = \frac{0{,}1}{0{,}0124} = 8{,}08; \quad \gamma = \frac{x'_в}{x'_н} = \frac{0{,}0183}{0{,}1} = 0{,}183.$$

---

* В случае необходимости учета — см. пример 4.

** В случае необходимости учета $k_{rп}(s)$ и $k_{xп}(s)$ последний может быть произведен так, как это сделано в примере 4.

Подставляя в выражения для $c_r$ и $c_x$ полученные точные значения $\alpha$, $\beta$ и $\gamma$, получим окончательно

$$c_{r(s=1)} = 0{,}641; \quad c_{x(s=1)} = 0{,}214.$$

Следовательно,

$$r'_{2(s=1)} = r'_{\text{в}} c_{r(s=1)} = 0{,}037 \cdot 0{,}641 = 0{,}0237 \ \textit{ом};$$

$$r'_{2\,\text{э}(s=1)} = x'_{\text{н}} c_{x(s=1)} = 0{,}1 \cdot 0{,}214 = 0{,}0214 \ \textit{ом}.$$

19. Пусковой ток

$$I'_{\text{п}2} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (x_\sigma + x'_{2\,\text{э}})^2}} = \frac{220}{10^{-2}\sqrt{(1{,}18 + 2{,}37)^2 + (9{,}66 + 2{,}14)^2}} = 1780 \ a.$$

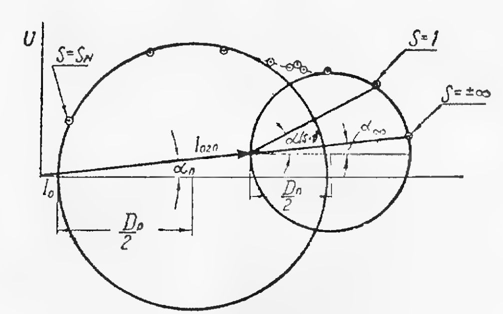



Рис. 242. Геометрическое место токов двухклеточного двигателя. Кружки с точками обозначают токи, полученные аналитическим методом.

Принимаем $I_{\text{п}1} \approx I'_{\text{п}2}$,

$$\frac{I_{\text{п}1}}{I_N} = \frac{1780}{282} = 6{,}32 \ (\text{задано } 6).$$

20. Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = mI'^2_{\text{п}2} r'_{\text{в}} c_r = 3 \cdot 1780^2 \cdot 0{,}037 \cdot 0{,}641 = 225 \cdot 10^3 \ \textit{синхронных вт};$$

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_N} = \frac{225}{155} = 1{,}45 \ (\text{задано } 1{,}5).$$

21. Максимальный момент

$$M_{\max} \approx \frac{mU_1^2}{2\left[x_\sigma + x'_{\text{н}}\left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^2\right](1+\sigma)} = \frac{3 \cdot 220^2}{2\left[0{,}0966 + 0{,}1\left(\frac{1}{1+0{,}336}\right)^2\right]1{,}1} = 434 \cdot 10^3 \ \textit{синхронных вт};$$

$$\frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{434}{155} = 2{,}8 \ (\text{задано } 2{,}5).$$

22. Номинальное скольжение соответствует заданию, так как сопротивление ротора выбрано с учетом скольжения.

23. $\cos\varphi_N$ соответствует заданию (см. пример 3).

24. Данные для построения характеристики (рис. 244) сведены в табл. 69.

25. Построение упрощенной диаграммы (рис. 242):



*Таблица 69*

**Расчет пусковых характеристик двигателя с двойной клеткой**

| Определяемые величины \ Скольжение, $s$ | 1 | 0,5 | 0,35 | 0,30 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,014 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $c_{r(s)} = \dfrac{1 + \frac{1}{\alpha} + \beta^2(1+\gamma\alpha)s^2}{\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2(1+\gamma)^2 s^2}$ | 0,641 | 0,530 | 0,465 | 0,414 | 0,340 | 0,278 | 0,259 | 0,253 |
| $c_{x(s)} = \dfrac{\frac{1}{\alpha^2} + \beta^2\gamma(1+\gamma)s^2 + \gamma}{\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2(1+\gamma)^2 s^2}$ | 0,214 | 0,325 | 0,399 | 0,430 | 0,483 | 0,548 | 0,565 | 0,572 |
| $\dfrac{r'_{2(s)}}{s} = \dfrac{c_{r(s)} r'_{\text{в}}}{s}$ | 0,0237 | 0,0392 | 0,0491 | 0,0510 | 0,0628 | 0,103 | 0,192 | 0,668 |
| $x_{2\,\text{э}(s)} = c_{x(s)} x'_{\text{н}}$ | 0,0214 | 0,0325 | 0,0399 | 0,0430 | 0,0483 | 0,0548 | 0,0565 | 0,0572 |
| $x_\sigma + c_1 x_{2\,\text{э}(s)}$ | 0,1185 | 0,1299 | 0,1374 | 0,1410 | 0,1461 | 0,1530 | 0,1544 | 0,1552 |
| $r_1 + \dfrac{c_1 r'_{2(s)}}{s}$ | 0,0360 | 0,0519 | 0,0683 | 0,0702 | 0,0824 | 0,1173 | 0,2088 | 0,6958 |
| $z_{(s)} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{c_1 r'_{2(s)}}{s}\right)^2 + (x_\sigma + c_1 x_{2\,\text{э}(s)})^2}$ | 0,1241 | 0,1396 | 0,1536 | 0,1575 | 0,1679 | 0,1926 | 0,2590 | 0,7120 |

| Определяемые величины \ Скольжение, $s$ | 1 | 0,5 | 0,35 | 0,30 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,014 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I'_{2(s)} = \dfrac{U}{z_{(s)}}$ | 1780 | 1578 | 1433 | 1398 | 1295 | 1140 | 850 | 309 |
| $M_{(s)} = mI'^2_{2(s)}\dfrac{r'_{2(s)}}{2}$ | 225 000 | 292 000 | 302 004 | 298 000 | 316 000 | 402 000 | 416 000 | 191 000 |
| $\cos\varphi_2 = \dfrac{r_1 + c_1 r'_{2(s)}}{z_{(s)}}$ | 0,290 | 0,373 | 0,434 | 0,436 | 0,490 | 0,610 | 0,805 | 0,975 |
| $\sin\varphi_2$ | 0,957 | 0,928 | 0,901 | 0,90 | 0,895 | 0,791 | 0,592 | 0,222 |
| $I'_{2a} = I'_{2(s)}\cos\varphi_2$ | 515 | 590 | 620 | 610 | 634 | 695 | 684 | 302 |
| $I_{2р} = I'_{2(s)}\sin\varphi_2$ | 1713 | 1460 | 1292 | 1260 | 1158 | 900 | 504 | 65,5 |
| $I_1 = \sqrt{(I_{0a} + I'_{2a})^2 + (I_{0р} + I'_{2р})^2}$ | 1884 | 1688 | 1513 | 1476 | 1400 | 1212 | 911,6 | 347,9 |
| $\cos\varphi_1 = \dfrac{c_1 I_{0a} + I'_{2a}}{c_1 I_1}$ | 0,273 | 0,348 | 0,406 | 0,41 | 0,45 | 0,569 | 0,754 | 0,883 |

$\alpha = \dfrac{r'_н}{r'_в} = \dfrac{0,0124}{0,037} = 0,336$; $\beta = \dfrac{x'_н}{r'_н} = \dfrac{0,1}{0,0124} = 8,08$; $\gamma = \dfrac{x'_в}{x'_н} = \dfrac{0,0183}{0,1} = 0,183$; $r'_1 = 0,0118$; $x_\sigma = 0,0966$.



а) диаметр рабочего круга

$$D_р = \frac{U}{x_\sigma + x'_н\left(\frac{c_1}{1+\alpha}\right)^2} = \frac{220}{0,0966 + 0,1\cdot\left(\frac{1}{1+0,336}\right)^2} = 1440\ a$$

(при этом, если $\sigma_1 < 0,05$, можно принять $c_1 = 1$);

б) диаметр пускового круга

$$D_п = \frac{U_1}{c'_1 x_\sigma + c'^2_1 x'_в} = \frac{220}{1,966\cdot 0,0966 + 1,966^2\cdot 0,0183} = 850\ a,$$

где

$$c'_1 = 1 + \frac{x_\sigma}{x'_н} = 1 + \frac{0,0966}{0,1} = 1,966;$$

в) ток холостого хода для рабочего круга $I_0 = 76\ a$ (пример 2);

г) ток холостого хода для пускового круга

$$I_{02п} = \frac{U}{z_{0п}} = \frac{U}{\sqrt{(x'_н c'_1)^2 + (r_1 c'_1)^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,1\cdot 1,966)^2 + (0,0118\cdot 1,966)^2}} = 1112\ \ a;$$

д) тангенс угла поворота намагничивающего тока пускового круга $I_{02п}$

$$\operatorname{tg}\alpha_п = \frac{r_1}{x'_н} = \frac{0,0118}{0,1} = 0,118;$$

е) тангенс угла поворота диаметра пускового круга в соответствии с формулой (85) § 11-14 можно полагать равным нулю;

ж) определение точки $s = 1$ на пусковом круге

$$\operatorname{tg}\alpha_{(s=1)} = \frac{r'_в c'_1}{x_\sigma + x'_в c'_1} = \frac{0,037\cdot 1,966}{0,0966 + 0,0183\cdot 1,966} = 0,549.$$

**Вариант с фигурным пазом (бутылочный паз, § 11-19)**

1. Сечение стержня из условия допустимой плотности тока

$$q_с = \frac{I_{2N}}{s_с} = \frac{565}{500} = 1,13\ см^2.$$



Рис. 243. Бутылочный паз.

Выбираем согласно табл. 67 стержень с размерами $d = 1,05\ см$; $b = 0,4\ см$; $h_2 = 1,2\ см$ ($h = 3,35\ см$; $b_1 = 0,93$) и сечением $q_с = 1,34\ см^2$.

2. Пазовая проводимость рассеяния для малых скольжений при открытии паза $h_0 = 0,5\ см$ и $b_0 = 0,4\ см$ (рис. 243)

$$\lambda_{п2} = \frac{h}{3b}\left[1 + \frac{b_1}{b}\left(\frac{h_1}{h}\right)^3 - \left(\frac{b_1 h_1}{bh}\right)^3\right] + \frac{h_0}{b_0} = \lambda_{пi} + \frac{h_0}{b_0} = 1,91 + 1,25 = 3,16,$$

где

$$\lambda_{пi} = \frac{3,35}{3\cdot 0,4}\left[1 + \frac{0,93}{0,4}\left(\frac{1,05}{3,35}\right)^3 - \left(\frac{0,93\cdot 1,05}{0,4\cdot 3,35}\right)^3\right] = 1,91;$$

$$\frac{h_0}{b_0} = 1,25.$$

3. Пазовая проводимость рассеяния для больших скольжений

$$\lambda_{п\xi} = \lambda_{пi}k_{xп} + \frac{h_0}{b_0} = 1,91k_{xп} + 1,25 = \frac{0,91}{\sqrt{s}} + 1,25,$$

где

$$k_{x\text{п}} = \frac{3 + 6\left(\frac{b_1 h_1}{bh}\right)^3}{2\xi} = \frac{1{,}593}{\xi}; \quad \xi = h\sqrt{s\frac{\rho_{\text{с.н}}}{\rho_\text{с}}};$$

для медных стержней $\xi = h\sqrt{s} = 3{,}35\sqrt{s}$, тогда $k_{x\text{п}} = \frac{0{,}475}{\sqrt{s}}$.

4. Лобовая и дифференциальная проводимости рассеяния соответственно равны

$$\lambda_{\text{л}2} = 0{,}82; \quad \lambda_{\delta 2} = 1{,}875 \text{ (пример 3).}$$

5. Реактивное сопротивление рассеяния ротора:

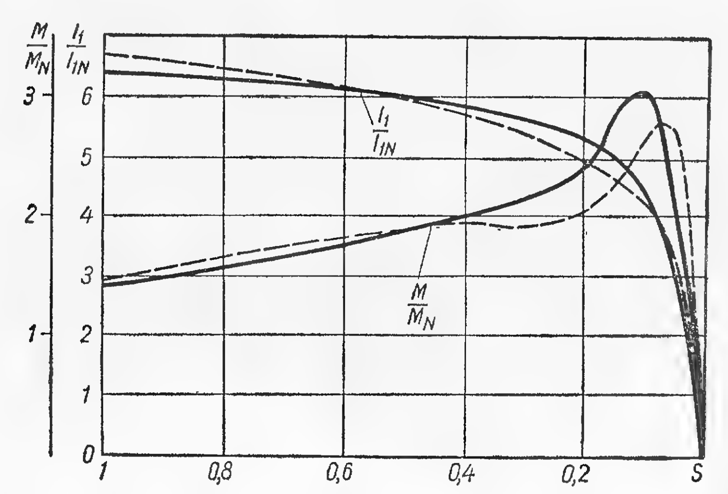



Рис. 244. Пусковые характеристики асинхронного двигателя 155 *квт*: ——— с бутылочным пазом; — — -- — с двухклеточным.

а) при малых скольжениях

$$x_2' = 2\pi\mu_0 l i f(\lambda_{\text{п}2} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\delta 2})\,k =$$

$$= 2\pi \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 39 \cdot 50 \cdot (3{,}16 + 0{,}82 + 1{,}875) \cdot 82{,}5 = 0{,}0738 \text{ ом};$$

б) при больших скольжениях

$$x_2' = 2\pi\mu_0 l i f(\lambda_{\text{п}2\xi} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\delta 2})\,k = x_2'(s) =$$

$$= 1{,}26 \cdot 10^{-2}\left(\frac{0{,}91}{\sqrt{s}} + 3{,}94\right) \text{ ом}.$$

5. Сопротивление стержня

$$r_{\text{с}\xi} = \rho_{\text{с}\,75}\frac{l_\text{с}}{q_\text{с}}k_r = 0{,}0217 \cdot \frac{46 \cdot 10^{-2}}{134}k_r = 74{,}5 \cdot 10^{-6}\,k_r \text{ ом},$$

где

$$k_r = 1 + \frac{4}{45}\xi^4 \quad \text{при } \xi < 1 \; (s < 0{,}1);$$

$$k_r \approx 1 + \frac{4}{45}\xi^3 \quad \text{при } 1 < \xi < 2 \quad (0{,}1 < s < 0{,}35);$$

$$k_r = \xi \quad \text{при } \xi > 2 \quad (s > 0{,}35).$$



6. Сопротивление короткозамыкающего кольца

$$r_\text{л} = \rho_{\text{л}75}\frac{l_\text{л}}{q_\text{л}} = 0{,}0217 \cdot \frac{2{,}28 \cdot 10^{-2}}{300} = 1{,}65 \cdot 10^{-6} \text{ ом}.$$

7. Активное сопротивление ротора

$$r_2' = r_2'(s) = k\left(r_{\text{с}\xi} + \frac{r_\text{л}}{2\sin^2\frac{\pi p}{Z_2}}\right) = 82{,}5 \cdot \left(74{,}5 \cdot 10^{-6}k_r + \frac{1{,}65 \cdot 10^{-6}}{0{,}034}\right) =$$

$$= (61{,}5 \cdot 10^{-4}k_r + 40 \cdot 10^{-4}) \text{ ом}.$$

8. Ток ротора в функции скольжения

$$I_2'(s) = \frac{U_1}{\sqrt{\left[r_1 + \frac{r_2'(s)\,c_1}{s}\right]^2 + [x_1 + x_2'(s)\,c_1]^2}}.$$

9. Момент вращения

$$M(s) = mI_2'^2\frac{r_2'(s)}{s}.$$

Результаты расчета сводим в табл. 70.
По данным табл. 70 строим пусковые характеристики (рис. 244).

*Таблица 70*

**Расчет пусковых характеристик двигателя с бутылочным пазом**

| Определяемые величины \ Скольжение, s | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,01 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\xi$ | 3,35 | 3,00 | 2,60 | 2,12 | 1,50 | 1,06 | 0,75 | 0,335 |
| $k_{x\text{п}}$ | 0,475 | 0,536 | 0,613 | 0,75 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| $\lambda_{\text{п}2\xi}$ | 2,16 | 2,26 | 2,42 | 2,69 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 |
| $x_2'(s)$ (в *ом*) | 0,0610 | 0,0625 | 0,0645 | 0,0675 | 0,0738 | 0,0738 | 0,0738 | 0,0738 |
| $k_r$ | 3,35 | 3,00 | 2,60 | 2,12 | 1,30 | 1,105 | 1,028 | 1,00 |
| $r_2'(s)$ (в *ом*) | 0,0246 | 0,02260 | 0,0200 | 0,0170 | 0,0120 | 0,0108 | 0,0103 | 0,0101 |
| $I_2'(s)$ (в *а*) | 1720 | 1685 | 1640 | 1570 | 1430 | 1210 | 847 | 210 |
| $M(s)$ (в *вт*) | 219 000 | 240 000 | 268 000 | 314 000 | 367 000 | 472 000 | 294 000 | 133 000 |
| $\cos\varphi_2$ | 0,289 | 0,311 | 0,342 | 0,396 | 0,474 | 0,67 | 0,853 | 0,980 |
| $\sin\varphi_2$ | 0,959 | 0,954 | 0,940 | 0,920 | 0,880 | 0,745 | 0,520 | 0,200 |
| $I_{2\text{а}}'$ (в *а*) | 496 | 525 | 560 | 621 | 679 | 810 | 722 | 206 |
| $I_{2\text{р}}'$ (в *а*) | 1650 | 1605 | 1540 | 1440 | 1260 | 902 | 440 | 420 |
| $I_1$ (в *а*) | 1800 | 1765 | 1710 | 1640 | 1495 | 1275 | 895 | 242 |
| $\cos\varphi_1$ | 0,276 | 0,297 | 0,327 | 0,378 | 0,452 | 0,631 | 0,804 | 0,890 |
| $I_1/I_N$ | 6,40 | 6,27 | 6,06 | 5,82 | 5,30 | 4,53 | 3,17 | 0,86 |
| $M(s)/M_N$ | 1,41 | 1,55 | 1,73 | 2,02 | 2,37 | 3,04 | 1,90 | 0,86 |

## *Пример 6*

### Расчет асинхронного двигателя с массивным ферромагнитным ротором (§ 11-20)

(Статор и воздушный зазор асинхронного двигателя с массивным ротором взяты те же, что и для асинхронного двигателя с кольцами в примере 2.)

1. Коэффициент

$$k_\beta = \frac{1 + a_1' \beta}{\beta} = \frac{1 + \frac{2}{\pi} 0{,}77}{0{,}77} = 1{,}94.$$

2. Относительная магнитная проницаемость при $I_2' = 1$

$$\mu_\text{к}' = \frac{B_{\text{к}1}}{\mu_0 \sqrt{2} A_{N1} k_{w1}} = \frac{2{,}04 \cdot 10^{-4}}{1{,}26 \cdot 10^{-8} \sqrt{2} \cdot 284 \cdot 0{,}91} = 44{,}3,$$

где $B_{\text{к}1} = 2{,}04 \cdot 10^{-4}$ (из кривой намагничивания); $A_{N1} = 284$ *а/см*.

Вначале определим параметры ротора при $\mu' = \mu_\text{к}' = \text{const}$, т. е. без учета изменения $\mu'$ с изменением тока ротора.

3. Постоянная величина $r_{2N}''$

$$r_{2N}'' = \frac{1}{p} a_r k_\beta 2 m_1 (w_1 k_{w_1})^2 \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\text{к} \rho \omega_1}{2}} \frac{I_{1N}}{U_N} =$$

$$= \frac{1 \cdot 1{,}94 \cdot 2 \cdot 3 (20 \cdot 0{,}91)^2}{2} \sqrt{\frac{1{,}26 \cdot 10^{-8} \cdot 44{,}3 \cdot 1{,}54 \cdot 10^{-5} \cdot 314}{2}} \times$$

$$\times \frac{282}{220} = 0{,}091.$$

Здесь

$$\rho = 1{,}023 \cdot 10^{-5} (1 + 0{,}00625 \cdot 80) = 1{,}54 \cdot 10^{-5}\ \textit{ом} \cdot \textit{см} -$$

— удельное сопротивление стали при 100°С; $a_r$ — принимаем равным единице.

Из примеров 2—5:

$$w_1 = 20 \text{ витков};\ k_{w1} = 0{,}91;\ I_{1N} = 282\ a;\ c_1 = 1;\ U_N = 220\ в;\ p = 2.$$

4. Приведенное сопротивление ротора по уравнению (256) при $I_2' = 1$

$$r_2'(s) \approx r_{2N}'' \sqrt{s} = 0{,}091 \sqrt{s}.$$

5. Сопротивления статорной обмотки

$$r_1' = r_{1\,100} (1 + \sigma_1) \doteq r_{1\,75}' \, 1{,}0212 \cdot \frac{235 + 100}{235 + 75} = 0{,}0131\ \textit{ом}$$

(ввиду повышенных потерь в роторе этого типа приводим сопротивление статора к 100°С);

$$\boldsymbol{r}_1 = r_1' \frac{I_N}{U_N} = 0{,}0131 \cdot \frac{282}{220} = 0{,}0168 \text{ долей единицы};$$

$$\boldsymbol{x}_1 = x_1 \frac{I_{1N}}{U_N} = 0{,}06 \frac{282}{220} = 0{,}077 \text{ долей единицы}.$$

6. Ток ротора в относительных единицах (по отношению к $I_N$)

$$\dot{I}_2' = \frac{U_1}{r_1 + jx_1 + c_1 \left( \pm 1 + j \frac{a_x}{a_r} \right) \frac{r_2''}{s}}.$$



Полагая

$$c_1 = 1 + \sigma_1 \approx 1;$$

$$a_r = a_x = 1;$$

$$U_1 = 1,$$

получим

$$\dot{I}_2' = \frac{1}{(0{,}0168 + j\,0{,}077) + (j \pm 1) \frac{0{,}091}{\sqrt{s}}};$$

$$I_2' = \frac{1}{\sqrt{\left(0{,}0168 \pm \frac{0{,}091}{\sqrt{s}}\right)^2 + \left(0{,}077 + \frac{0{,}091}{\sqrt{s}}\right)^2}}.$$

Это уравнение является уравнением окружности в символической форме, причем $\sqrt{s}$ — параметр.

Координатами центров окружности и диаметрами будут:

а) для двигательного режима

$$\xi = \frac{U}{2(\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{r}_1)} = \frac{1}{2(0{,}077 - 0{,}0168)} = 8{,}3;$$

$$\eta_0 = -\xi_0 = -8{,}3;$$

$$R_\text{д} = \frac{U}{\sqrt{2}(\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{r}_1)} = \frac{1}{\sqrt{2}(0{,}077 - 0{,}0168)} = 11{,}7;$$

б) для генераторного режима

$$\xi_0 = \frac{U}{2(\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{r}_1)} = \frac{1}{2(0{,}077 + 0{,}0168)} = 5{,}33;$$

$$\eta_0 = \xi_0 = 5{,}33;$$

$$R_\text{г} = \frac{U}{\sqrt{2}\,|\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{r}_1|} = \frac{1}{\sqrt{2}\,|0{,}077 + 0{,}0168|} = 7{,}55.$$

7. Влияние изменения магнитной проницаемости. Определим приведенное сопротивление ротора с учетом изменения магнитной проницаемости в зависимости от изменения тока ротора

$$r_2''(s) = r_{2N}'' \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{I_2''}}.$$

Ток ротора в относительных единицах при учете изменения магнитной проницаемости по (259) равен:

$$I_2' = \frac{U_1}{r_1 + jx_1 + c_1 \left( \pm 1 + j \frac{a_x}{a_r} \right) \frac{r_2''}{s}} =$$

$$= \frac{U_1}{r_1 + jx_1 + (j \pm 1) r_{2N}'' \frac{1}{\sqrt{s I_2'}}},$$

или

$$I_2' = \frac{1}{\left(0{,}0168 \pm \frac{0{,}091}{\sqrt{s I_2'}}\right)^2 + \left(0{,}077 + \frac{0{,}091}{\sqrt{s I_2'}}\right)^2}.$$

Как доказано выше, это уравнение представляет части двух пересекающихся окружностей. Координаты центров этих окружностей и их радиусы будут такие же, как и в том случае, когда не учитывается изменение магнитной проницаемости с изменением тока ротора. Однако при учете изменения магнитной проницаемости тому же току ротора, что и при $\mu' = \text{const}$, будет соответствовать уже другое скольжение. На рис. 231 дано сопоставление геометрических мест тока ротора с учетом и без учета изменения $\mu'$, а также для сравнения приведено геометрическое место двигателя с нормальным короткозамкнутым ротором. На рис. 232 представлены кривые тока и момента в функции скольжения без учета и с учетом изменения магнитной проницаемости.

---

*Глава двенадцатая*

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

## *Общие вопросы проектирования синхронных машин*

### 12-1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, КОНСТРУКТИВНЫЕ ТИПЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЯВНОПОЛЮСНЫХ МАШИН

Синхронные машины в большинстве случаев используются как генераторы гидравлических и тепловых электростанций. Среди этих машин имеются как развитые серии гидро- и турбогенераторов (серии СВ, Т-2, ГС и др.), так и весьма крупные единицы индивидуального и серийного исполнения (гидро- и турбогенераторы мощностью до 100 000 *ква* и выше). Значительное распространение получили синхронные двигатели (серии МС, ВДС, ДС, ДСК, ДСР), обладающие высоким $\cos\varphi$, надежностью, экономичностью.

По конструктивному типу синхронные машины делятся на явнополюсные (обычно тихоходные или средней скорости) и неявнополюсные.

Конструктивные данные некоторых построенных синхронных машин приведены в табл. 82 и 89.

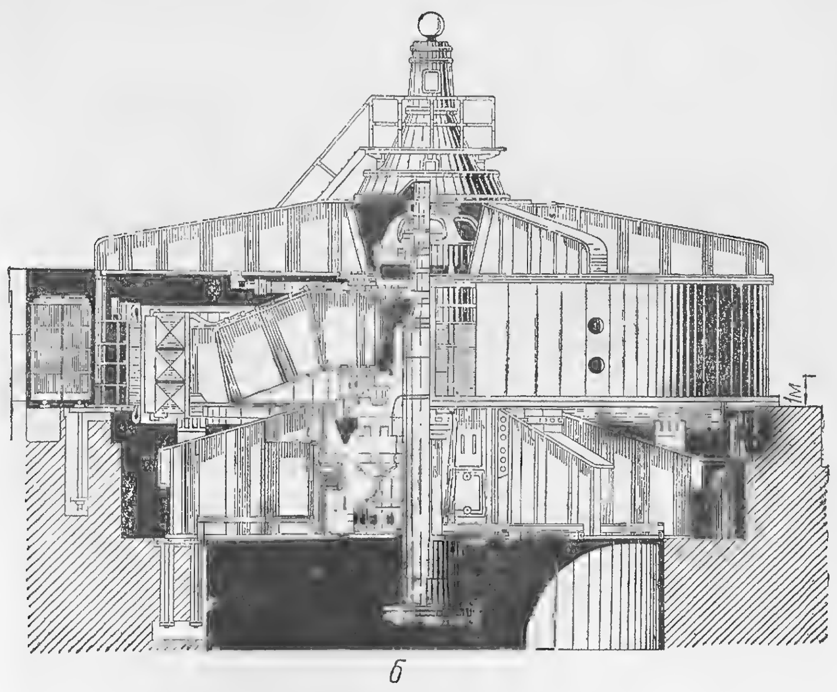
Крупные гидрогенераторы. Крупные гидрогенераторы— обычно машины вертикального исполнения подвесного или зонтичного типа (рис. 245, *а*, *б*). Зонтичный тип обычно выбирается при больших диаметрах, когда $\frac{D}{l} > 4$. Подвесной тип может быть выполнен при любых соотношениях $\frac{D}{l}$. Основные преимущества и недостатки обоих типов [1] заключаются в следующем: зонтичный тип позволяет значительно облегчить конструкцию статора и крестовин, так как вся тяжесть ротора и реакция воды приходятся на нижнюю крестовину, имеющую меньшие размеры и опирающуюся на фундамент. В подвесном типе это давление приходится на верхнюю крестовину, имеющую бóльшие размеры и опирающуюся на корпус статора. Таким образом, корпус статора и поддерживающая крестовина в подвесном типе оказываются более тяжелыми,

а

Рис. 245,*а*. Гидрогенераторы:
*а* — подвесного типа.



чем в зонтичном. Однако в зонтичном типе гидрогенератора потери на вентиляцию больше, чем в подвесном. Имеются и некоторые другие преимущества последнего. Мощность — от 1000 *ква* до 200 000 *ква* в сверхмощных машинах (днепровские гидрогенераторы 90 000 *ква*, 88,2 об/мин, 13,8 *кв*; щербаковский гидрогенератор 70 000 *ква*, 62,5 об/мин; куйбышевский гидрогенератор 123 500 *ква*, 68,2 об/мин, 13,8 *кв*; братский гидрогенератор




б

Рис. 245,*б*. Гидрогенераторы:
*б* — зонтичного типа.

265 000 *ква*, 125 об/мин, 13,8 *кв*; намечается производство гидрогенераторов мощностью 300 000 *квт* и выше).

Основными проблемами при конструировании крупных гидрогенераторов являются:

а) конструкция и производство подпятника — наиболее ответственной детали; давление на подпятник в крупных машинах доходит до 2000 *т* и выше;

б) крепление полюсов с расчетом на угонную скорость;

в) выбор системы возбуждения;

г) выбор махового момента;

д) выбор типа обмотки статора;

е) устройство успокоительной обмотки на полюсах;

ж) уменьшение габаритов и вентиляционных потерь, повышение к. п. д.;

з) простота и надежность конструкции, удобство монтажа и эксплуатации, достаточная жесткость конструкции и т. д.

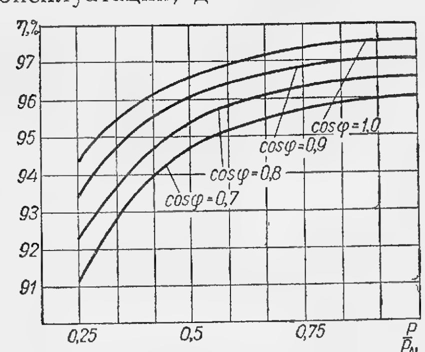



Рис. 246. Изменение к. п. д. гидрогенераторов большой мощности в зависимости от нагрузки.

На рис. 246 приведены кривые к. п. д. в функции нагрузки. В табл. 71 показаны мощности и скорости вращения построенных гидрогенераторов.

Окружная скорость и полюсное деление. Максимальная величина окружной скорости $v$ и полюсного деления $\tau$ (так как $\tau$ *см* $= v\left(\frac{50}{f}\right)$ *м/сек*) находится из условия предельных напряжений в полюсах при угонной скорости. Для радиально-осевых турбин (Френсиса) $n_{уг} = (1{,}8-2)\, n_N$, для пропеллерных турбин (Каплана) $n_{уг} = (2{,}8-3)\, n_N$. При нормальных способах крепления полюсов и обмотки (рис. 247) предельную скорость принимают равной $v = 130$ *м/сек*. Отсюда получаем $\tau_{max} = \frac{130}{2} = 65$ *см* или $\frac{130}{3} = 43{,}3$ *см* для турбин Френсиса и Каплана соответственно. Экономическая величина полюсного деления выбирается из условия минимума действительной стоимости с учетом вентиляционных потерь (гл. 2).

*Таблица 71*

**Технические данные гидрогенераторов серии СВ**

| Тип и исполнение | Номинальная мощность (в *ква*) | Номинальная мощность (в *квт*) | Напряжение $U_{лN}$ (в *в*) | cos φ | К. п. д. (в проц.) | Скорость вращения $n/n_{уг}$ (в об/мин) | Общий вес (в *т*) | $GD^2$ (в *тм*²) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| СВ $\frac{1160}{180}$ 72 подвесной | 103 500 | 83 000 | 13 800 | 0,80 | 97,4 | 83,3/167 | 986 | 39 000 |
| СВ $\frac{1250}{170}$ 96 зонтичный | 68 750 | 55 000 | 13 800 | 0,80 | 97,2 | 62,5/165 | 1200 | 50 000 |
| СВ $\frac{1100}{148}$ 88 зонтичный | 50 000 | 40 000 | 15 750 | 0,80 | 96,2 | 68,2/150 | 834 | 28 000 |
| СВ $\frac{665}{110}$ 32 подвесной | 44 000 | 37 500 | 10 500 | 0,85 | 97,2 | 187,5/375 | 327 | 3 000 |
| СВ $\frac{600}{110}$ 40 зонтичный | 25 000 | 20 000 | 10 500 | 0,80 | 96,4 | 150/375 | 250 | 2 100 |
| СВ $\frac{425}{135}$ 16 подвесной | 33 000 | 23 000 | 11 000 | 0,70 | 96,3 | 375/700 | 215 | 520 |
| СВ $\frac{1500}{200}$ 88 зонтичный | 123 500 | 105 000 | 13 800 | 0,85 | 97,4 | 68,2/150 | 1650 | 121 000 |
| СВ $\frac{850}{190}$ подвесной | 85 500 | 72 500 | 13 800 | 0,85 | — | 125/235 | 770 | 12 500 |



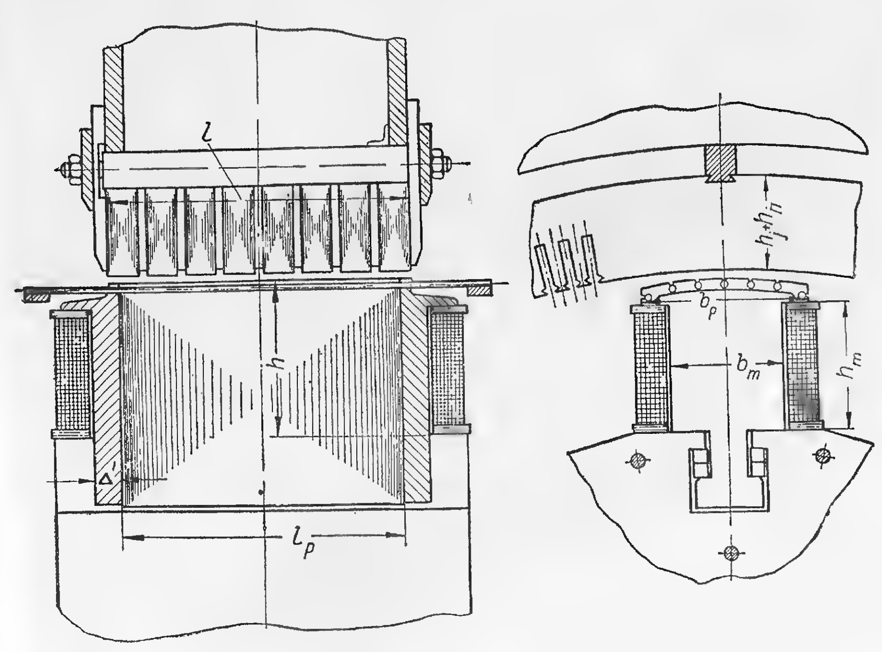



Рис. 247. Конструкция статора и полюсной системы гидрогенератора.

Статор. Корпус статора (рис. 245) сварной, из листового железа толщиной 30—50 *мм* с ребрами жесткости на внутренней стороне. К ребрам привариваются клинья с ласточкиными хвостами, на которых собирается активное железо статора, штампованное из отдельных сегментов (рис. 248). Размеры сегментов выбираются из условий наивыгоднейшего раскроя стандартного листа стали. Активное железо стягивается в осевом направлении стяжными болтами, проходящими между корпусом и активным железом статора. С торцовых сторон активное железо прессуется нажимными плитами с приваренными пальцами (рис. 247). Пальцы препятствуют образованию веера и вибрации крайних листов и одновременно образуют вентиляционные каналы для охлаждения торцовой и лобовой частей. Крайние пакеты имеют ступенчатую форму (рис. 249).

Системы вентиляции. При *радиальной* системе вентиляции основная теплоотдача происходит через радиальные вентиляционные каналы. Преимуществом этой системы является удобство устройства вентилятора и возможность использования вентилирующего действия ротора. Недостатки этой системы: 1) недостаточно эффективная отдача тепла в каналах (малая скорость воздуха, неравномерное распределение скорости по каналам); 2) низкая теплоотдача обмотки возбуждения; 3) повышенная трудоемкость изготовления статора и обода ротора, связанная с необходимостью устройства распорок (десятки тысяч на одну крупную машину); 4) уменьшение эксплуатационной надежности вследствие выпучивания изоляции в каналы и ее преждевременного износа; 5) увеличенный расход меди и изоляции за счет длины каналов; 6) увеличенные расходы на строительную часть; 7) неудовлетворительные аэродинамические качества и повышенные потери (потери от удара при входе в каналы).

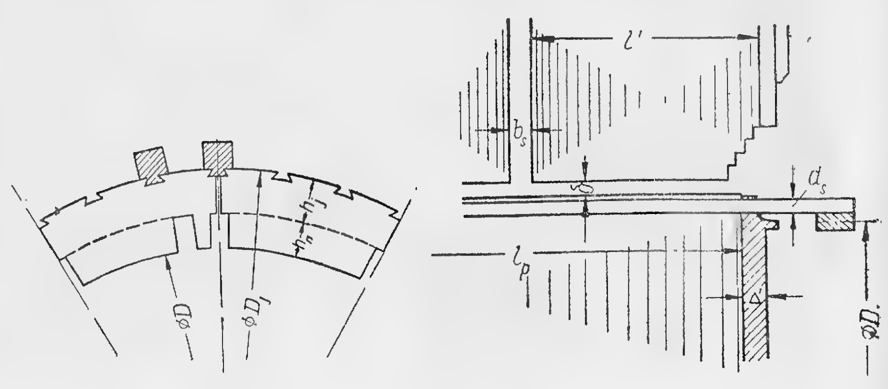



Рис. 248. Крепление сегментов железа статора.

Рис. 249. Конструкция концевых пакетов статора, успокоительной обмотки и нажимных щек ротора.

При *аксиальной* вентиляции тепло отводится за счет интенсивного охлаждения расточки и спинки статора. Кроме того, могут быть аксиальные каналы, выштампованные в статоре (см. ниже). Достоинствами этой системы является устранение перечисленных недостатков радиальной системы. Недостатками этой системы для крупных машин считались: 1) трудности устройства аксиального вентилятора; 2) неравномерность нагрева по длине машины (температурный «перекос»), а также по высоте спинки и зубцов статора.

Эти недостатки можно устранить, если применить конструкцию вентилятора по рис. 250, т. е. использовать вентилирующее действие спиц ротора путем устройства односторонних раструбов. Двусторонние раструбы для радиальной системы предложены группой авторов [80]. Неравномерность нагрева может быть уменьшена, если увеличить расход воздуха и уменьшить высоту спинки статора. Охлаждающая поверхность спинки может быть развита путем увеличения числа свободных выштампованных ласточкиных хвостов (рис. 248).

*Внутренняя форсированная вентиляция и водяное охлаждение.* В мощных и сверхмощных гидрогенераторах вес и габариты машин настолько велики, что создают значительные трудности производства, монтажа и эксплуатации. Поэтому в настоящее время проектируются гидрогенераторы с внутренним охлаждением меди, в частности с водяным охлаждением. Это дает возможность значительного снижения веса машин. Внутреннее охлаждение начинает широко применяться в турбогенераторах и описано в § 12-13.

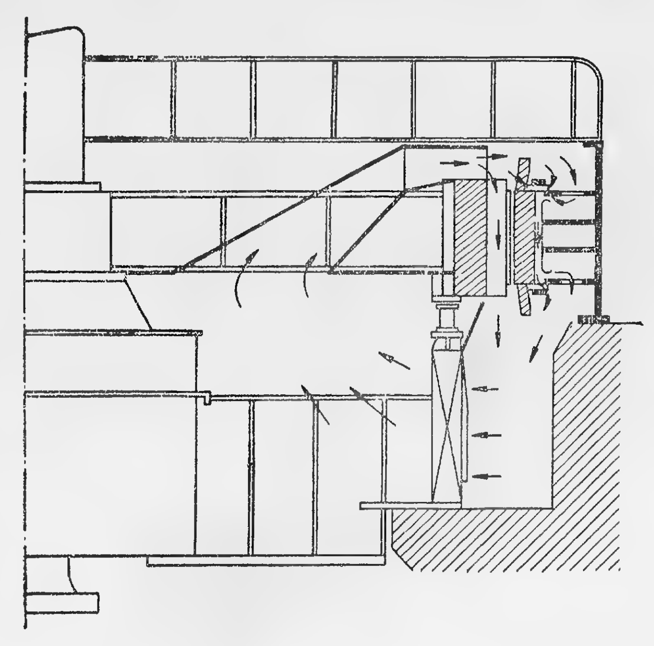


Рис. 250. Схема осевой вентиляции гидрогенератора.

Необходимо, однако, иметь в виду, что эффект форсированного охлаждения и увеличения электромагнитных нагрузок в гидрогенераторах значительно ниже, чем в турбогенераторах. В гл. 2 показано, что относительные потери в меди обратно пропорциональны полюсному делению машины, и, следовательно, они тем выше, чем более тихоходна машина. Окружная скорость ротора гидрогенератора в 3—4 раза ниже окружной скорости ротора турбогенератора. Приблизительно во столько же раз относительные потери в меди гидрогенератора выше относительных потерь в меди турбогенератора. Поэтому при увеличении удельных нагрузок к. п. д. гидрогенератора будет снижаться более значительно. Имеются и другие причины, по которым нежелательно увеличение удельных нагрузок. Ввиду этого форсированное охлаждение гидроге-

нераторов может оказаться оправданным лишь в случае сверхмощных машин, которые трудно осуществимы при обычных способах охлаждения.

*Обмотка статора.* Обычно применяется двухслойная катушечная или стержневая обмотка с непрерывной изоляцией несколькими слоями микаленты толщиной 0,13 *мм* (приложение V). Каждый активный проводник катушечной обмотки состоит из ряда параллельных элементарных проводников сечением не более 15 *мм*$^2$. Активные проводники изолируются друг от друга асбестовой лентой толщиной 0,5 *мм* либо микалентой. Стержневая обмотка выполняется из плетеных стержней (два стержня на паз), рис. 37.

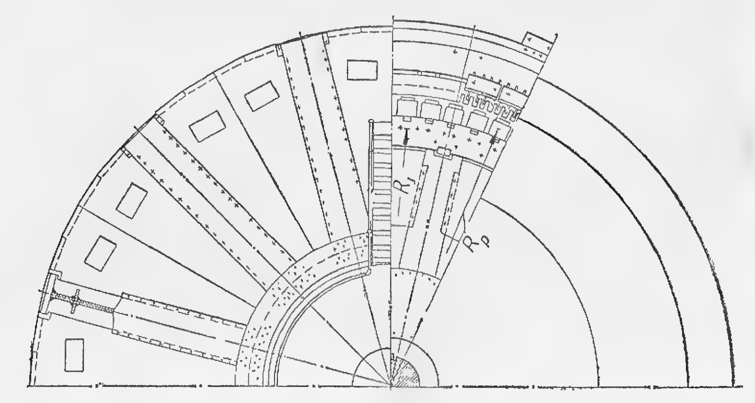



Рис. 251. Конструкция ротора и нажимных плит статора крупного гидрогенератора.

Стержни изолируются микалентой. Преимуществом стержневой обмотки является ее устойчивость от перенапряжений между витками, так как пазовая изоляция является одновременно и витковой (грозоупорная обмотка).

Ротор. Обод ротора выполняется из штампованных сегментов или дисков (при относительно малых диаметрах) толщиной 6 *мм*. В первом случае сегменты собираются вперекрой на шпонках роторной звезды (рис. 251), насаживаемой на вал гидрогенератора. Во втором случае обод, собранный из отдельных дисков, насаживается непосредственно на вал.

*Полюса,* штампованные из стали толщиной 1; 1,5; 2 *мм*, собираются на двух или четырех болтах и сжимаются коваными щеками, выступающие полки которых поддерживают лобовые части обмотки возбуждения. Целесообразно также применение массивных полюсов без демпферной обмотки.

*Изоляция полюсов* может быть класса А или В. В первом случае сердечник изолируется несколькими слоями прессшпана, а во втором — миканитом и асбестовой бумагой. Сверху и снизу катушки кладутся деревянные или бакелитовые шайбы толщиной 15—20 *мм*. Катушка удерживается в сжатом состоянии пружинами, утопленными в обод (рис. 252,*а*).



*Катушки возбуждения* мотаются из голой полосовой меди шириной до 75 *мм* и толщиной до 10 *мм*. Изоляция класса А выполняется в виде прокладок между витками из электрокартона 0,3 *мм*, а изоляция класса В — из асбеста толщиной 0,25—0,4 *мм*, который после намотки приклеивается к меди шеллаком.

Демпферная обмотка выполняется в виде медных (реже латунных) круглых стержней, замкнутых по торцам кольцами (полная клетка), или сегментами (неполная клетка). Демпферные стержни помещаются в пазах (рис. 249 и 252), выштампованных в полюсных наконечниках. Замыкающие кольца (или сегменты) привариваются к стержням твердым припоем. В конструкции с массивными полюсами роль

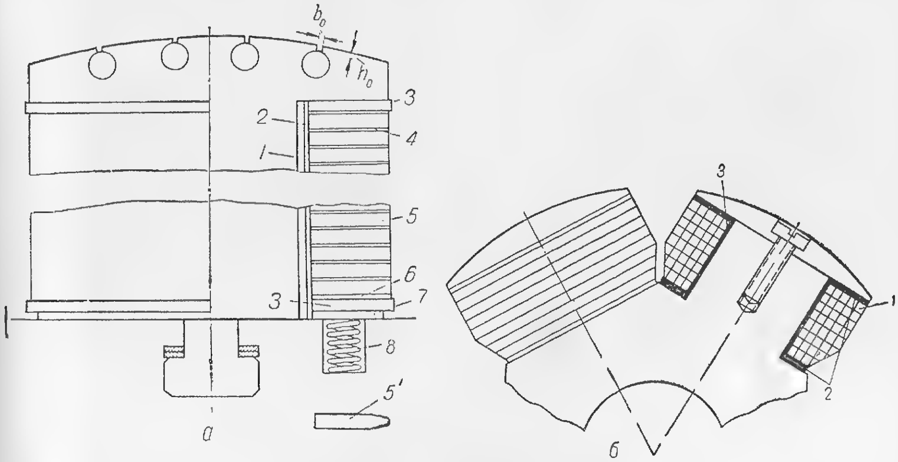



Рис. 252. Конструкция полюсов и изоляция обмотки возбуждения:
*а* — однорядная обмотка из голой меди: *1* — асбобумага 0,4 *мм* — 3 слоя; *2* — микафолий 0,4 *мм* — 2 слоя; *3* — шайба 8 — 10 — 15 *мм* (дерево или гетинакс); *4* — асбобумага 2 × 0,25 *мм*; *5* — шина обмотки; *6* — шайба из асботкани; *7* — стальная шайба 3 — 5 *мм*; *8* – пружина для прессовки; *б* — многорядная обмотка из изолированного провода: *1* — провод изолированный (ПБД или ПДА); *2* — изоляционные шайбы (электрокартон или асбокартон толщиной 1,5 — 2 *мм*); 3 — изоляция полюса (электрокартон или асбобумага 0,3 — 0,4 *мм* в два слоя).

демпферной обмотки выполняют массивные наконечники или массивные полюсы.

Типы подпятников, устройство крестовин и другие вопросы конструкции см. [1].

Синхронные генераторы мелких и средних мощностей. Широкое распространение для установок местного значения получили генераторы малых и средних мощностей. Для передвижных или стационарных мелких установок применяют генераторы серий аПН: КаПН (однофазные) и аПНТ (трехфазные), имеющие конструкцию, аналогичную машинам постоянного тока серии ПН. Мощности — от 0,83 до 9 *ква*; напряжение — 120, 127 и 230 *в*; 1500 об/мин. Серии аПН и аПНТ изготовляются с самовозбуждением, аПН-35 — с независимым возбуждением. Для более крупных установок применяются синхронные генераторы серий С и СГ от 15 до 60 *ква*, при 230 и 400 *в*, 1000 и 1500 об/мин. Якорь

возбудителя (четырехполюсный генератор постоянного тока) сидит на одном валу с синхронным генератором. Станина возбудителя составляет одно целое с передним щитом генератора. Вентиляция аксиальная, осуществляемая вентилятором, установленным со стороны привода. Изоляция обмоток класса А предназначена для работы в сухом помещении.

Для местных электростанций средней мощности применяются генераторы серий ГД, ГЛУ, ГС и ВГС. Генераторы серий ГД, ГЛУ (мощности от 270 до 750 *ква*; напряжение 400/230 *в*, 6000 *в*; скорость вращения 300, 375, 187 об/мин) рассчитаны на привод от дизеля или локомобиля.

Конструкция станины — сварная. Обмотка статора имеет изоляцию класса В при 6000 *в* и класса А при 400/230 *в* и выполняется двухслойной с укороченным шагом при открытых пазах. Обмотка возбуждения имеет изоляцию класса В. Вентиляция — симметричная, радиальная. Подобную конструкцию имеют и синхронные генераторы серии ГС 300 — 1375 *ква*, 400/230 и 6000 *в*; 214, 250, 500 и 600 об/мин—предназначенные для работы от гидротурбины с горизонтальным валом. Синхронные гидрогенераторы серий ВГС (200—4000 *ква*, 400/230 *в*, 3150 и 6000 *в*; 100, 130, 150, 187, 214, 250, 300, 375 об/мин) применяются для привода от гидротурбины с вертикальным валом. Серия ВГС-2 мощностью от 375 до 750 *ква* изготовляется в зонтичном исполнении, остальные — в подвесном. В генераторах этих серий возбудителями являются быстроходные генераторы постоянного тока серии ПН, соединенные с валом синхронного генератора клиноременной передачей.

## 2-2. ПАРАМЕТРЫ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ И ДРУГИХ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Из условий устойчивости параллельной работы обычные пределы параметров для гидрогенераторов следующие:

$$\text{о. к. з.} = \frac{1}{x_d} = 0{,}8 \div 1{,}7;$$
$$x_d = 1{,}3 \div 0{,}6;$$
$$x_q = 0{,}7 \div 0{,}35;$$
$$x'_d = 0{,}4 \div 0{,}2;$$
$$x''_d = 0{,}25 \div 0{,}15.$$

Согласно гл. 2 уменьшение реактивных сопротивлений и повышение о. к. з., желательное с точки зрения устойчивости, приводят к удорожанию машин. Так, например, машины, имеющие о. к. з. = 0,8 и 1,7, отличаются в стоимости приблизительно в обратном отношении, т. е. как $\frac{1{,}7}{0{,}8} = 2{,}1$. Для работы на длинную линию передачи необходимо, чтобы параметры машины не находились в пределах

$$x'_d < x_c < x_d,$$



где $x_c$ — емкостное сопротивление линии, так как при этом возможен параметрический резонанс с емкостью линии*. Желательно, чтобы $x_c$ был по крайней мере на 50—100% выше значения $x_q$. Параметры синхронных двигателей выбираются из условий перегрузочной способности, пусковых условий, экономических соображений и т. п. Сводка параметров для различных машин дана в табл. 72.

*Таблица 72*

**Параметры синхронных явнополюсных машин (в относительных единицах)**

| Тип | $x_s$ | $x_d$ | $x_q$ | $x'_d$ | $x''_d$ | $x''_q$ | $x_0$ | $T_{d0}$ (в сек.) | $T_i$ (в сек.) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| СВ $\frac{1500}{200}$ 88 | 0,089 | 0,505 | 0,322 | 0,190 | 0,143 | 0,152 | 0,054 | 5,30 | 14,7 |
| СВ $\frac{1160}{180}$ 72 | 0,169 | 0,886 | 0,605 | 0,348 | 0,258 | 0,269 | 0,100 | 7,22 | 8,9 |
| СВ $\frac{850}{190}$ 48 | 0,153 | 0,873 | 0,587 | 0,317 | 0,227 | 0,235 | 0,110 | 6,45 | 7,4 |
| СВ $\frac{1100}{148}$ 88 | 0,161 | 0,637 | 0,500 | 0,310 | 0,232 | 0,239 | 0,091 | 4,30 | 8,9 |
| СВ $\frac{1030}{120}$ 68 | 0,138 | 0,738 | 0,513 | 0,275 | 0,199 | 0,205 | 0,082 | 4,03 | 7,7 |
| КСВ 75 000-11 | 0,072 | 1,700 | 1,027 | — | 0,142 | 0,143 | — | — | — |
| КСВ 37 500-11 | 0,147 | 2,080 | 1,257 | 0,450 | 0,221 | 0,216 | 0,110 | — | — |
| КС 30 000-11 | 0,163 | 1,770 | 1,070 | — | 0,270 | — | 0,100 | 8,80 | — |

## 12-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Регулировочные характеристики*, представляющие зависимость от нагрузки и $\cos\varphi$ кратности тока возбуждения по отношению к его номинальному значению при холостом ходе, приведены на рис. 253.

*Повышение напряжения* генераторов при сбросе нагрузки лежит обычно в пределах 28—40%.

*Электромагнитный момент* явнополюсных машин при стационарной нагрузке в долях номинального

$$\frac{M}{M_N} = \boldsymbol{M} = \frac{\boldsymbol{UE}}{x_d} \cdot \sin\theta + \frac{\boldsymbol{U}^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{U}$ — напряжение на зажимах в долях номинального;

$\boldsymbol{E}$ — э. д. с. возбуждения в долях номинальной, равная

$$\boldsymbol{E} = \frac{i_f}{i_{f\delta}}, \qquad (2)$$

* Горев А. А., Переходные процессы синхронной машины, ГЭИ, 1950.

где $i_{f\delta}$ — ток возбуждения при $E = U_N$ по спрямленной характеристике холостого хода.

Угол мощности $\theta$ определяется из векторной диаграммы (рис. 270). В зависимости от нагрузки и $\cos\varphi$ получаем

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{I\cos\varphi}{\frac{U}{x_q} \pm I\sin\varphi}, \qquad (3)$$

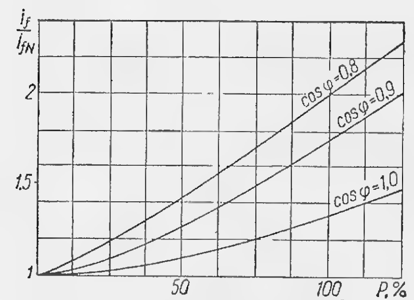



Рис. 253. Регулировочные характеристики гидрогенераторов.

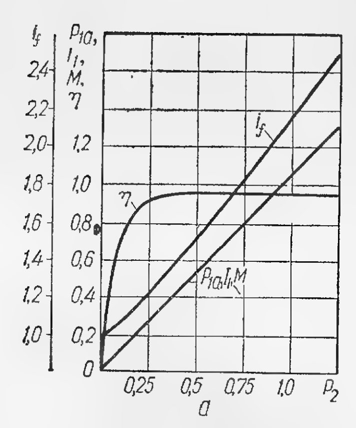
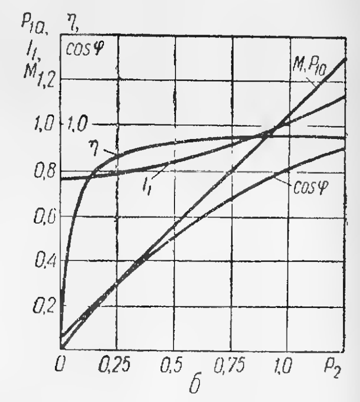




Рис. 254. Рабочие характеристики синхронного двигателя (1920 *квт*, 6000 *в*, 1000 об/мин) в относительных единицах:
*а* — при $\cos\varphi = 0{,}8 = \text{const}$; *б* — при $i_f = i_{fN} = \text{const}$.

где (+) и (—) относятся к режимам перевозбуждения и недовозбуждения соответственно.

*Рабочие характеристики* синхронного двигателя даны на рис. 254.

## 12-4. ВОЗБУЖДЕНИЕ

Возбудителем гидрогенераторов и других синхронных машин обычно являются генераторы постоянного тока параллельного или независимого возбуждения.

В крупных гидрогенераторах наиболее выгодным является расположение возбудителя (и подвозбудителя) на валу гидрогенератора в верхней части (рис. 245). Для малых гидрогенераторов обыкновенно достаточно одного возбудителя параллельного возбуждения. В крупных агрегатах главный возбудитель получает возбуждение от подвозбудителя или вспомогательного возбудителя (рис. 255).

Возбудители, особенно при наличии быстродействующего регулятора напряжения, проектируются с большим потолочным напряжением и соответственно с большим запасом мощности. Максимальное напряжение возбудителя обычно около 140% от номинального. Номинальное напряжение 110 *в* при мощности до 100 *квт* и 220 *в* при большей мощности.

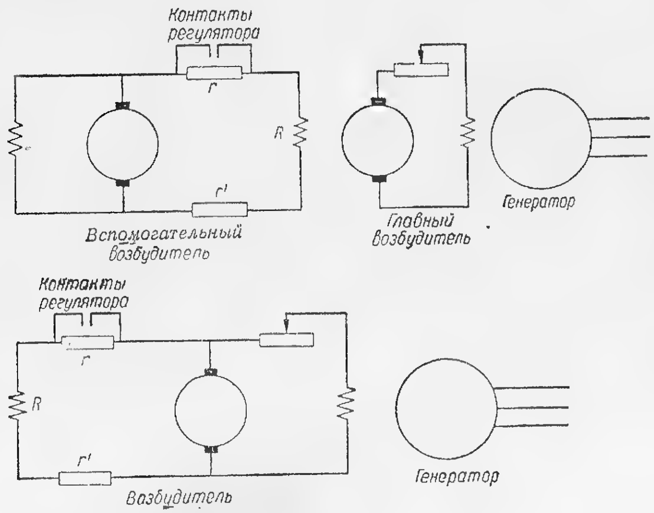



Рис. 255. Системы возбуждения гидрогенераторов.

При очень больших мощностях синхронных машин приходится повышать напряжение возбудителя с целью уменьшения тока возбуждения. Проектирование возбудителя большой мощности с высоким «потолком» возбуждения и значительной скоростью нарастания напряжения («взлетом») представляет трудную задачу. Расчет характеристики нарастания напряжения дан в [65, 53]. Современные сверхмощные гидрогенераторы проектируются с ионной системой возбуждения, обеспечивающей высокую надежность и повышенные требования в отношении «потолка» и «взлета» напряжения.

## 12-5. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И КОМПЕНСАТОРЫ

Синхронные двигатели широко применяются вследствие высоких эксплуатационных данных (надежность, высокий $\cos\varphi$, возможность работать с опережающим $\cos\varphi$, экономичность и прочее). Основными недостатками синхронных двигателей являются необходимость постоянного тока для возбуждения и невозможность регулирования скорости при постоянной частоте питаю-

щего тока. Применяются они для привода компрессоров (серия ДСК); вентиляторов (серия ДС), насосов, дробилок, гребных винтов и многих других приводов. Данные об основных сериях синхронных двигателей и компенсаторов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 73 и 74.

*Таблица 73*

**Основные данные синхронных двигателей**

| Тип | Скорость вращения (в об/мин) | Номинальная мощность (в *квт*) | Номинальное напряжение (в *в*) | К. п. д. (в проц.) | Опережающий cos φ | $\frac{I_{пуск}}{I_N}$ | $\frac{M_{пуск}}{M_N}$ | $\frac{M_{max}}{M_N}$ | Тип возбудителя | Общий вес (в *кг*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ДС 116/34-6 | 1000 | 575 | 6000 | 93,0 | 0,80 | 5,0 | 1,40 | 2,3 | ПН-205 | — |
| ДС 140/39-8 | 750 | 600 | 6000/3000 | 91,5 | 0,66 | 4,4 | 1,40 | 2,4 | ПН-400 | 9100 |
| ДС 140/39-10 | 600 | 600 | 6000/3000 | 92,2 | 0,66 | 5,4 | 1,70 | 2,8 | ПН-400 | 9300 |
| ДСК 170/20-16 | 375 | 325 | 6000/3000 | 90,5 | 0,90 | 4,6 | 0,66 | 2,3 | ПН-290 | 7500 |
| ДСК 213/20-28 | 214 | 360 | 6000/3000 | 91,5 | 0,90 | 3,2 | 0,65 | 1,9 | ПН-290 | 7800 |
| ДСК 213/34-28 | 214 | 625 | 6000/3000 | 92,0 | 0,90 | 3,5 | 0,60 | 2,0 | ПН-290 | 10 500 |
| ДСК 213/20-32 | 187 | 360 | 6000/3000 | 90,5 | 0,90 | 3,5 | 0,60 | 2,2 | ПН-290 | 9050 |
| ДСК 213/30-36 | 167 | 625 | 6000/3000 | 90,5 | 0,90 | 4,0 | 0,50 | 2,0 | ПН-290 | 13 600 |
| ДСР 325/13-64 | 94 | 275 | 6000 | 84,0 | 0,80 | 6,0 | 1,25 | 3,8 | ПН-МА-200 | 13 600 |
| ДСР 325/24-64 | 94 | 350 | 6000 | 85,0 | 0,80 | 6,0 | 1,25 | 3,9 | ПН-ПА-200 | 14 500 |
| ДСР 325/29-64 | 94 | 425 | 6000 | 86,0 | 0,80 | 5,5 | 1,20 | 3,6 | ПН-МА-200 | 16 000 |
| ДСП 116/49-4 | 1500 | 1300 | 6000 | 95,0 | 0,90 | 5,0 | 1,00 | 1,5 | ПН-205 | 8900 |
| МС 322-7/6 | 1000 | 1170 | 6000 | 94,4 | 0,80 | 3,4 | 0,80 | 2,1 | МП 543-1/5 | 8600 |
| МС 322-7/10 | 600 | 560 | 6000 | 92,9 | 0,80 | 5,2 | 1,10 | 2,6 | МП 543-2/4 | 7490 |

*Таблица 74*

**Синхронные компенсаторы серии КС и КСВ**

| Тип | $P_N$ (в *квар*) | $U_{лN}$ (в *в*) | $I_N$ (в *а*) | *n* (в об/мин) | Возбудитель | Общий вес (в *т*) | $GD^2$ (в *тм²*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КСВ 75 000-11 | 75 000 | 11 000 | 3940 | 750 | — | 220,30 | — |
| КСВ 37 500-11 | 37 500 | 10 500 | 2070 | 750 | — | 148,10 | — |
| КСВ 30 000-11 | 30 000 | 10 500 | 1650 | 600 | ГП150-600, 150 *квт*, 250 *в* | 118,80 | 105,2 |
| КС 15 000-11 | 15 000 | 10 500 | 825 | 750 | В54/23-6, 80 *квт*, 115 *в* | 54,10 | 24,8 |
| КС 7500-6 | 7500 | 6000 | 656 | 1000 | ВС34/18, 50 *квт*, 115 *в* | 24,64 | 8,6 |
| КС 5000-6 | 5000 | 6000 | 459 | 1000 | ВС 29.5/21, 34 *квт*, 65 *в* | 18,82 | 3,7 |



К о н с т р у к ц и я   с и н х р о н н ы х   д в и г а т е л е й   и   к о м п е н с а т о р о в. В конструктивном отношении двигатели и компенсаторы отличаются от синхронных генераторов по существу только внешней компановкой (горизонтальные подшипники, стояковые или щитовые), конструкцией вала, рассчитанного на условия нагрузки, наличием пусковой клетки на роторе.

Экономичность синхронных двигателей может быть повышена устранением пусковых обмоток (двигатель с массивными полюсами), а также применением компаундирования с полупроводниковыми выпрямителями без возбудителя (рис. 256).

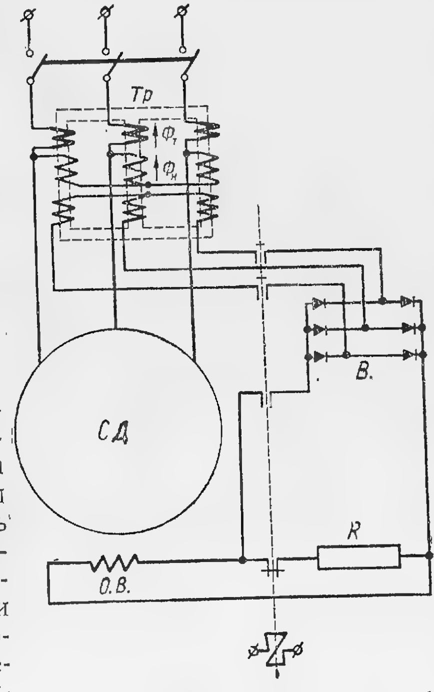



Рис. 256. Схема смешанного возбуждения синхронного двигателя.

## 12-6. ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

Турбогенераторы представляют синхронные машины горизонтального исполнения (рис. 257) приводимые от паровой турбины. Основные данные турбогенераторов серий Т2 и ТВ2 завода «Электросила» приведены в табл. 75.

С к о р о с т ь   в р а щ е н и я. Наиболее широкое распространение получили двухполюсные турбогенераторы при частоте тока 50 *гц* и скорости вращения 3000 об/мин. Однако могут быть выполнены высокочастотные двухполюсные турбогенераторы до скоростей порядка 30 000 об/мин и выше. При этом с ростом скорости, как и для всех электрических машин, предельная мощность уменьшается соответственно закону

$$Pn \to \text{const}.$$

К о н с т р у к ц и я   р о т о р а. Наибольшее распространение получил цельнокованый круглый ротор (рис. 257). Материал поковки— турбороторная сталь высоких механических параметров.

Радиальные профрезерованные пазы ротора представлены на рис. 260, паз с уложенной обмоткой возбуждения — на рис. 295. Обмотка ротора крепится клиньями из дюралюминия или алюминиевой бронзы.

На поверхности ротора обычно фрезеруются канавки глубиной 5—6 *мм* с шагом 12—15 *мм*. Назначение канавок — увеличить поверхность охлаждения и уменьшить поверхностные потери от высших гармонических.

Таблица 75

**Основные данные турбогенераторов**

| Тип | Мощность (в *квт*) | cos φ | Напряжение (в *в*) | Мощность возбудителя (в *квт*) | Напряжение возбудителя (в *в*) | К. п. д. (в проц.) | Общий вес (в *т*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Т2-05-2 | 500 | 0,80 | 230, 400, 525 | 23 | 115/135 | 92,00 | 7,0 |
| Т2-1-2 | 1000 | 0,80 | 230, 400, 525 | — | — | 93,60 | 8,0 |
| Т2-1, 5-2 | 1500 | 0,80 | 230, 400, 525 | 20 | 60 | 94,30 | 10,0 |
| Т2-3-2 | 3000 | 0,80 | 3150, 6300 | 30 | 115/172 | 95,00 | 16,0 |
| Т2-3, 5-2 | 3500 | 0,80 | 3150, 6300 | 40 | 115/178 | 95,20 | 16,0 |
| Т2-6-2 | 6000 | 0,80 | 3150, 6300 | 50 | 150/220 | 96,00 | 26,0 |
| Т2-12-2 | 12 000 | 0,80 | 3150, 6300, 10 500 | 75 | 230/288 | 96,60 | 39,0 |
| Т2-25-2 | 25 000 | 0,80 | 6300, 10 500 | 120 | 230/350 | 97,20 | 67,0 |
| Т2-50-2 | 50 000 | 0,85 | 10 500 | 145 | 230/450 | 97,60 | 125,0 |
| Т2-100-2 | 100 000 | 0,90 | 15 700 | 220 | 350/650 | 97,80 | 220,0 |
| ТВ2-30-2 | 30 000 | 0,80 | 10 500 | 120 | 230/350 | 98,27 | — |
| ТВ2-50-2 | 50 000 | 0,80 | 10 500 | 145 | 230/450 | 98,56 | 152,5 |
| ТВ2-100-2 | 100 000 | 0,85 | 13 800 | 220 | 350/650 | 98,78 | 257,5 |
| ТВ2-150-2 | 150 000 | 0,90 | 18 000 | 360 | 450 | 98,95 | 242,0 |
| ТВФ-200-2 | 200 000 | 0,85 | 11 000 | — | — | 98,80 | — |

Лобовые части крепятся бандажами, изготовляемыми из специальной стали. Ротор представляет наиболее ответственную часть машины, так как подвергается высоким механическим напряжениям от центробежных сил и значительным температурным напряжениям и смещениям. Предельная окружная скорость на наружной поверхности ротора достигает 175 *м/сек*, а предельный диаметр

$$D_{max} = \frac{v_{max}}{\pi n} = \frac{175}{\pi 50} = 1{,}1\ м.$$

Окружная скорость и предельный диаметр ротора могут быть увеличены, если применить более прочные стали.

В турбогенераторах большой мощности невозможно дальнейшее увеличение диаметра, поэтому приходится увеличивать длину. Так, в Т2-100 2 (100 000 *квт*) длина бочки ротора составляет около 6 *м*.

Механический, электрический и тепловой расчеты ротора должны быть весьма точными. При производстве роторов необходим, соответственно, тщательный контроль. Обмотка ротора подвергается тепловым и механическим напряжениям, в результате которых происходит изменение длины отдельных витков и смещение их лобовых частей. Последнее обстоятельство должно быть учтено при конструировании бандажей. Различные типы конструкций бандажей см. в [51, 68].



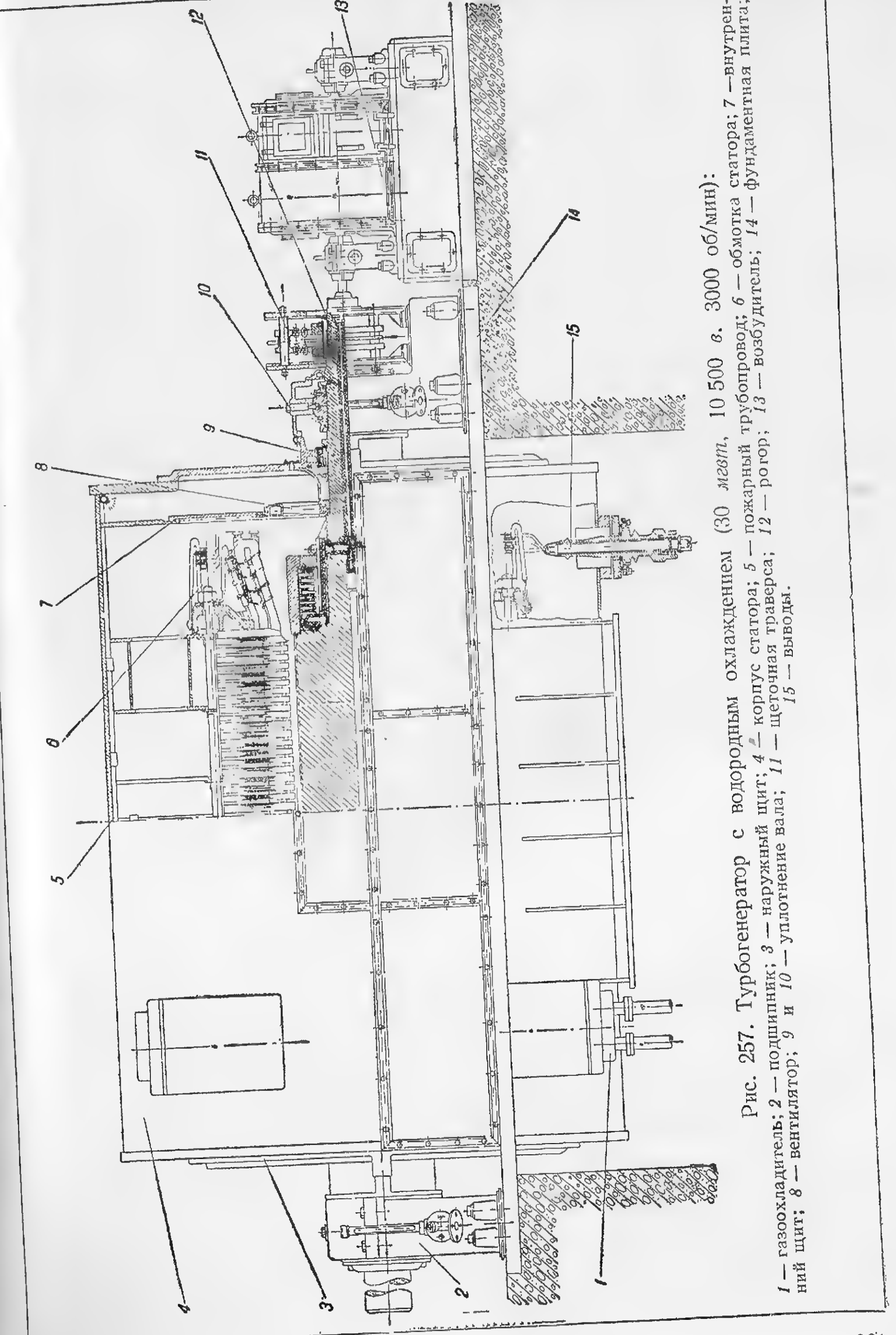



Рис. 257. Турбогенератор с водородным охлаждением (30 *мгвт*, 10 500 *в*, 3000 об/мин):

*1* — газоохладитель; *2* — подшипник; *3* — наружный щит; *4* — корпус статора; *5* — пожарный трубопровод; *6* — обмотка статора; *7* — внутренний щит; *8* — вентилятор; *9* и *10* — уплотнение вала; *11* — щеточная траверса; *12* — рогор; *13* — возбудитель; *14* — фундаментная плита; *15* — выводы.

Возбудитель является весьма ответственной частью, та как, в особенности в крупных машинах, представляет машину по стоянного тока, близкую к предельной мощности для скоросте вращения 3000 об/мин. Основные трудности — механические вибра ции ротора возбудителя, вызывающие разрушение паек коллектора и пр., а также получение достаточного запаса по коммутаци с расчетом на форсировку мощности при переходных режимах Турбовозбудители серии ВТ (табл. 76) устанавливаются на соб ственной фундаментной плите и заменяют ненадежно работающий возбудитель консольного типа. При обычной конструкции вала, когда якорь возбудителя жестко связан с валом турбогенератора, колебания якоря определяются колебаниями ротора турбогенера тора. Однако для нормальной работы возбудителя такие колеба ния чрезмерны. Их удается избежать применением системы двух валов. Основным валом возбудителя является жесткая втулка якоря, на которой собран сердечник. Через отверстие втулки проходит второй эластичный вал. На одном конце эластичного вала находится полумуфта для соединения с турбогенератором, а другой конец соединен с основным валом. При таком соединении колебания ротора почти не сказываются на работе возбудителя, а собственные колебания якоря ограничиваются значительно меньшими зазорами в подшипниках возбудителя.

*Таблица 76*

**Основные данные возбудителей серии ВТ**

| Тип возбудителя | Мощность (в *квт*) | Напряжение (в *в*) | Ток якоря (в *а*) | Минимальное напряжение устойчивой работы (в *в*) | Максимальное напряжение («потолок») (в *в*) | Скорость нарастания напряжения (в *в/сек*) | К. п. д. (в проц.) | Вес (в *кг*) | Тип турбогенератора |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ВТ-20—3000 | 20 | 60 | 334 | 10 | 120 | 120 | 80,0 | 900 | Т2-0, 75-2; Т2Б-1, 5-2 |
| ВТ-40—3000 | 40 | 115 | 348 | 20 | 175 | 240 | 87,0 | 1300 | Т2-2, 5-2 |
| ВТ-50—3000 | 50 | 150 | 333 | 40 | 220 | 280 | 88,0 | 1470 | Т2-4-2; Т2-6-2 |
| ВТ-75—3000 | 75 | 230 | 325 | 50 | 350 | 380 | 89,0 | 1540 | Т2-12-2 |
| ВТ-120—3000 | 130 | 250 | 520 | 50 | 400 | 400 | 90,0 | 2750 | Т2-25-2 |
| ВТ-170—3000 | 170 | 230 | 740 | 60 | 450 | 500 | 90,0 | 5150 | Т2-50-2 |

Конструкция магнитной системы обеспечивает необходимое максимальное значение напряжения и время нарастания возбуждения от нуля до максимума 2—3 сек. Для ускорения процесса возбуждения в цепь обмотки возбуждения возбудителя включается доба-



точное сопротивление. На главных полюсах основного возбудителя типа В-4-220-300 *в* для турбогенератора 100 *Мвт* помещена специальная обмотка, присоединяемая к электронному регулятору, повышающему динамическую устойчивость турбогенератора. Для турбогенераторов малой и средней мощности широко применяются возбудители серии Е (табл. 77).

*Таблица 77*

**Основные данные возбудителей серии Е**

| Тип | Мощность возбудителя (в *квт*) | Напряжение (в *в*) | Ток (в *а*) | Потолочное возбуждение (в *в*) | Тип турбогенератора |
|---|---|---|---|---|---|
| Е-41 | 23 | 115 | 200 | 132 | Т-2-0, 5-2; Т-2-1-2; Т-2-1, 5-2 |
| Е-51 | 30 | 115 | 261 | 144 | Т-2-3-2 |
| Е-61 | 40 | 140 | 286 | — | Т-2120/80 |
| Е-61*а* | 50 | 230 | 217 | 310 | Т-2140/80 |
| Е-71 | 75 | 230 | 325 | 285 | Т-2210/87 |
| Е-71*а* | 120 | 230 | 520 | 312 | Т-2270/98 |

Статор турбогенератора. Корпус статора — неразъемный, сварной. Железо статора штампуется из сегментов и набирается на «ласточкины хвосты». Радиальные вентиляционные каналы статора имеют стандартную ширину 1 *см* для всех машин и разделены распорками-ветреницами. Ширина пакетов берется от 3,5 до 4,5 *см* из условий нагрева пакета. Нажимные плиты, стягивающие пакеты, изготавливаются из магнитного или немагнитного материала. Немагнитные нажимные плиты применяются с целью уменьшения потерь в них от потоков рассеяния лобовых частей. Нажимные пальцы, устанавливаемые для устранения «веера» крайних пакетов, обычно бронзовые. Щиты статора закрывают обмотки и создают «камеру давления». Лабиринтовое уплотнение щитов устраняет подсос воздуха в камеру разрежения у вала генератора.

Наиболее распространенным типом *обмотки* является двухслойная корзиночная обмотка с сокращенным шагом (так же, как и в большинстве других машин переменного тока). Обычно применяется два плетеных стержня на паз (рис. 293).

Обмотка статора турбогенераторов мощностью выше 150 *Мвт* охлаждается непосредственно с помощью вентиляционных каналов внутри проводников или стержней обмотки (рис. 259).

Так же, как и в гидрогенераторах, изоляция обмотки непрерывная для пазовой и лобовой части (микалента).

В старых машинах встречается обмотка «эвольвентного типа» [2]. В настоящее время она не применяется из-за весьма больших дополнительных потерь, превышающих в несколько раз величину основных потерь в массивных соединительных «вилках» лобовых частей.

В турбогенераторах применяется обычно петлевая обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу ($q = 6—12$).

Крепление лобовых частей обмотки статора в турбогенераторах требует особого внимания. Большое число пазов на полюс и фазу при повышенных кратностях тока короткого замыкания вызывает весьма большие электродинамические силы в лобовых частях обмотки. Эти силы при недостаточном креплении могут вызвать полное разрушение обмотки. Лобовые части крепятся массивными кольцами из специальной стали.

Вентиляция. Вентиляция в турбогенераторах — обычно замкнутая, многоструйная [2]. При мощностях от 25 до 150 *Мвт* при-

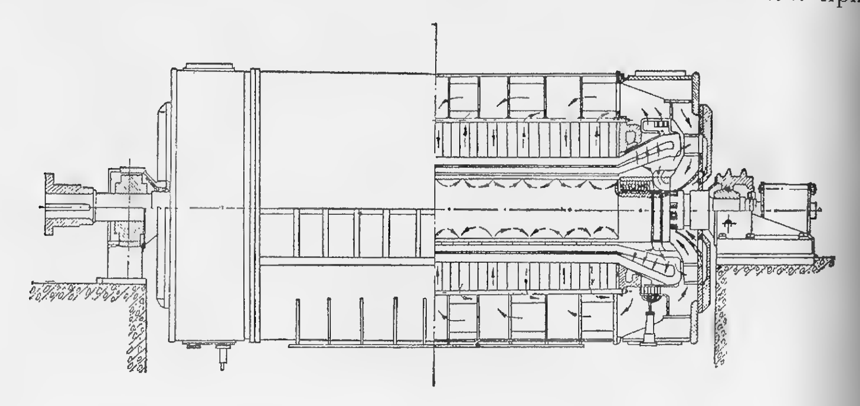


Рис. 258. Схема охлаждения турбогенератора 200 *Мвт* с внутренней самовентиляцией ротора:
⟶ холодный газ; — ⟶ горячий газ.

меняется водородное охлаждение, свыше 150 *Мвт* — системы с форсированной вентиляцией (рис. 258).

Увеличение мощности турбогенераторов в единице, связанное с увеличением к. п. д. турбоагрегата без существенного увеличения размеров машины, заставило разработать более эффективные способы отвода тепла. Такими способами охлаждения являются: а) повышение давления охлаждающего водорода в корпусе, б) непосредственное водородное охлаждение проводников обмоток через каналы внутри стержней обмоток ротора и статора, в) непосредственное жидкостное охлаждение стержней статорной обмотки и непосредственное водородное охлаждение обмотки ротора, г) косвенное охлаждение обмоток статора и ротора жидкостью, проходящей в специальных каналах в железе статора и ротора. Машиностроительными заводами Советского Союза и различными иностранными фирмами разработаны конструкции турбогенераторов мощностью 200—300 *Мвт* в единице с применением этих эффективных способов охлаждения [17, 16, 103].

Увеличение давления водорода в корпусе турбогенератора при обычной конструкции обмоток не дает достаточно большого увеличения мощности. Так, увеличение давления с 0,05 *ати* до 3 *ати*



позволяет увеличить мощность только на 25%. При этом вентиляционные потери увеличиваются пропорционально давлению водорода.

Непосредственное водородное охлаждение стержней обмоток статора и ротора при повышенном давлении водорода позволяет увеличить мощность в 2—3 раза при увеличении давления до 3 *ати*.

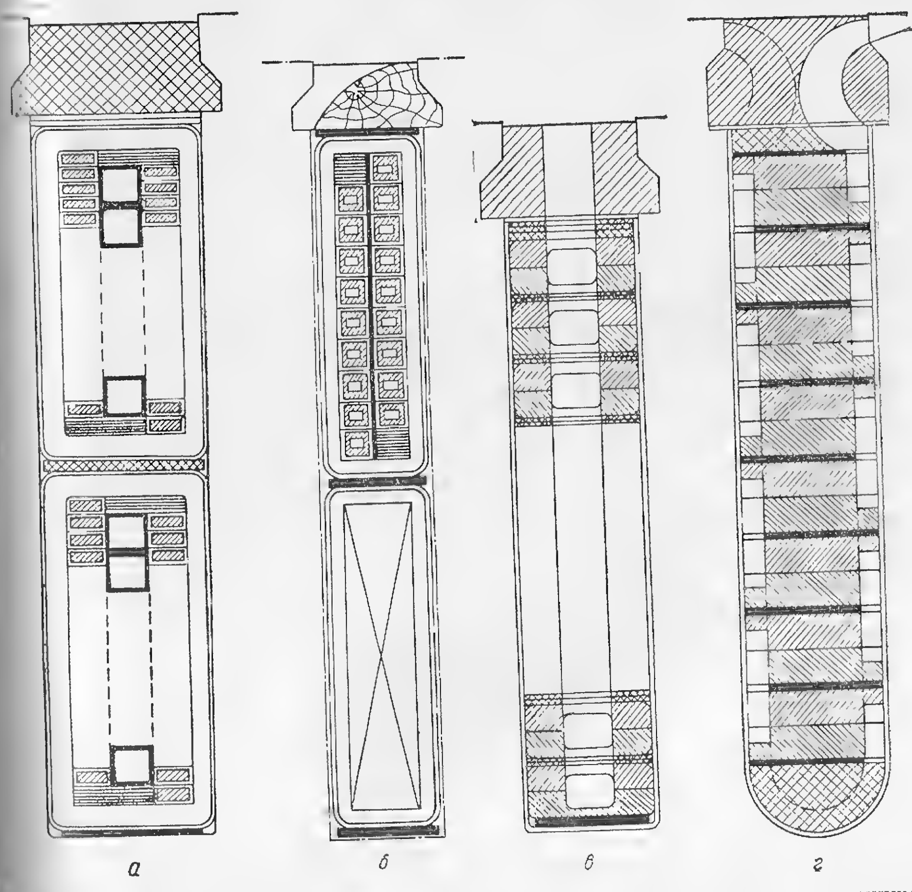



Рис. 259. Пазы статора (*а*, *б*) и ротора (*в*, *г*) турбогенераторов с внутренним охлаждением обмоток.

Увеличение мощности в единице ведет к увеличению электромагнитных нагрузок, а также вентиляционных потерь при повышении давления водорода. Это несколько уменьшает к. п. д. турбогенератора (например, к. п. д. турбогенератора мощностью 150 *Мвт* составляет 98,95%, турбогенератора 200 *Мвт* — 98,8%).

Конструкция пазов ротора и статора с непосредственным (внутренним) водородным охлаждением показана на рис. 259 и 260. Выполнение статорных обмоток с внутренним охлаждением связано со значительными технологическими трудностями.

Наиболее эффективным для обмоток статора является непосре-ственное жидкостное охлаждение. Жидкости как охлаждающ агенты имеют лучшие свойства по сравнению с газами. Это позв ляет уменьшить сечение каналов для прохождения жидкости, ч ведет к лучшему использованию пазовой зоны. Применение неп средственного жидкостного охлаждения (независимо от давлен может дать четырехкратное увеличение мощности в том же габ рите при некотором уменьшении к. п. д. турбогенератора.

В качестве охлаждающих агентов применяют воду, трансформ торное масло, пиранол и кремнийорганические масла. Применени непосредственного жидкостного охлаждения позволит повысит предельную мощность в единице до 750 000 *ква* и выше.

Параметры турбогенераторов. В табл. 78 при ведены основные пара метры турбогенераторо Получить о. к. з. такого же порядка, как в гидро генераторах, весьма труд но, так как это приводи к значительному увеличе нию стоимости машины, в мощных и сверхмощны машинах невозможно по условиям возрастания га баритов.

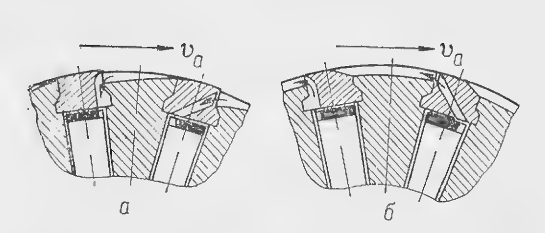



Рис. 260. Схема охлаждения обмотки ротора с забором охлаждающего газа из воздушного зазора: *а* — зона входа газа; *б* — зона выхода газа.

*Таблица 78*

**Параметры турбогенераторов (в относительных единицах)**

| Тип | $x_s$ | $x_d$ | $x'_d$ | $x''_d$ | $x_0$ | $x_2$ | $x_{fs}$ | $T_{d_0}$ (в сек.) | $T''_d$ (в сек.) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ТВФ-200-2 | 0,150 | 1,98 | 0,270 | 0,175 | 0,103 | 0,210 | 0,130 | 8,5 | 0,145 |
| ТВ2-150-2 | 0,097 | 1,49 | 0,180 | 0,122 | 0,066 | 0,149 | 0,090 | 11,9 | 0,180 |
| ТВ2-100-2 | 0,114 | 1,80 | 0,203 | 0,138 | 0,082 | 0,168 | 0,090 | 13,0 | 0,182 |
| ТВ2-50-2 | 0,110 | 1,84 | 0,200 | 0,135 | 0,056 | 0,164 | 0,095 | 11,6 | 0,158 |
| ТВ2-30-2 | 0,127 | 2,53 | 0,257 | 0,152 | 0,070 | 0,185 | 0,140 | 10,0 | 0,131 |
| Т2-25-2 | 0,113 | 1,95 | 0,203 | 0,128 | 0,080 | 0,156 | — | 10,2 | 0,133 |
| Т2-12-2 | 0,090 | 1,87 | 0,175 | 0,115 | 0,055 | 0,140 | — | 8,0 | 0,094 |
| Т2-6-2 | 0,095 | 1,65 | 0,170 | 0,120 | 0,067 | 0,147 | — | 7,1 | 0,092 |
| Т2-2, 5-2 | 0,076 | 1,10 | 0,126 | 0,091 | 0,067 | 0,111 | — | 4,4 | 0,064 |
| Т2-0, 75-2 | 0,116 | 1,38 | 0,188 | 0,141 | 0,038 | 0,172 | — | 3,8 | 0,044 |

Поэтому обычные пределы о. к. з. для мощных турбогенераторов не превышают 0,7. Сверхпереходная реактивность $x''_d$ из усло-



вий допустимой величины сверхпереходного тока должна быть не ниже

$$x''_d > \frac{1,8}{I''_{max}},$$

где $I''_{max}$ — допускаемый максимум тока в долях номинального. Обычно $I''_{max} < 15 I_N$.

При $I''_{max} = 15 I_N$ получим

$$x''_d > \frac{1,8}{15} = 0,12 \text{ (т. е. } 12\%).$$

Некоторые специфические вопросы проектирования турбогенераторов подробно изложены в [51], вопросы эксплуатации в [50].

## 12-7. ВЫБОР МАХОВОГО МОМЕНТА ($GD^2$) В СИНХРОННЫХ МАШИНАХ

Гидрогенераторы. В гидрогенераторах маховой момент обычно задается гидротехниками из соображений предельно допустимой скорости вращения при полном сбросе нагрузки. Эта величина зависит от типа гидравлической турбины, а также от типа гидросооружения (длина трубопровода и т. д.). Кроме того, выбор величины махового момента (или инерционной постоянной) определяется также условиями динамической устойчивости данной системы при параллельной работе.

Инерционная постоянная гидрогенератора $T_i$ связана с временем закрытия направляющего аппарата турбины $T_н$ и повышением скорости при сбросе нагрузки.

Энергия, подводимая к ротору за время закрытия, идет на повышение его кинетической энергии.

$$\int_0^{T_н} P dt = \frac{1}{2} J (\omega^2 - \omega_c^2), \tag{4}$$

где $J$ — момент инерции ротора. Подставляя $\omega = \omega_c + \Delta\omega$, получаем

$$P_{ср} T_н = \frac{1}{2} (J\omega_c) \left[\frac{2\Delta\omega}{\omega_c} + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_c}\right)^2\right]. \tag{5}$$

Полагая $2P_{ср} \approx P_N$ и вводя $T_i = \frac{GD^2 \omega_N^2}{4P_N}$, получим

$$\frac{\Delta n}{n_N} = \sqrt{\frac{T_н}{T_i} + 1} - 1 \leqslant (0,3-0,4), \tag{6}$$

откуда требуемая инерционная постоянная

$$T_i = T_н \frac{1}{\left[\frac{\Delta n}{n_N} + 1\right]^2 - 1} \tag{7}$$

и маховой момент

$$GD^2 = T_i \frac{4 P_N}{\omega_N^2}. \tag{8}$$

Если, например, время закрытия $T_н = 7$ сек. и $\frac{\Delta n}{n_N} = 0,35$, необходимая постоянная

$$T_i = 7 \frac{1}{(0,35+1)^2 - 1} = 8,5 \text{ сек.}$$

При $n_N = 150$ об/мин (2,5 об/сек) и $P_N = 30\,000$ *ква* получим требуемый маховой момент

$$GD^2 = 8,5 \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^6}{(2\pi \cdot 2,5)^2} \text{ кгм}^2 = 4,13 \cdot 10^6 \text{ кгм}^2, \text{ или } 4130 \text{ тм}^2.$$

Обычно в практике инерционные постоянные для крупных гидрогенераторов выбираются в пределах от 5 до 10 сек.

Величина задаваемого $GD^2$ имеет весьма большое влияние на размеры и стоимость машины, поэтому следует стремиться к минимальному $GD^2$ и максимально допустимому значению $\frac{\Delta n}{n_N}$.

Синхронные двигатели и генераторы. Особенно важным является выбор махового момента для двигателей, предназначенных для работы при пульсирующих моментах нагрузки (поршневые компрессоры), и генераторов, приводимых во вращение от дизеля или другого двигателя с пульсирующим моментом на валу. Маховой момент для заданной величины пульсации мощности или тока можно определить по [(291)—(296), гл. 8]. Ориентировочно для паровых машин, двухтактных приводных двигателей и компрессоров при учете только периода первой гармонической $T_1 = \frac{1}{n}$ сек.

$$GD^2 = 525 \frac{P_N}{\left(\frac{n}{100}\right)^4} \text{ кгм}^2 \qquad (9)$$

и для четырехтактных двигателей

$$GD^2 = 2100 \frac{P_N}{\left(\frac{n}{100}\right)^4} \text{ кгм}^2, \qquad (10)$$

где $n$ выражено в об/мин, $P$ — в *ква* (гл. 8).

Турбогенераторы. В турбогенераторах постоянная инерции по конструктивным условиям получается намного больше, чем требуемая минимальная величина из условий параллельной работы и изменения скорости вращения. Поэтому, как правило, в начале проектирования ею не задаются.

## *Расчет явнополюсных синхронных машин*

### 12-8. ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ

Проектное задание включает следующие основные данные:

1. Наименование машины (гидрогенератор, синхронный компенсатор, синхронный двигатель).

2. Номинальная мощность $P_N$ (для генераторов $P_N$ — в *ква, ва*; для двигателей $P_{2N} = P_N \cos\varphi\eta$ *квт*).



3. Напряжение $U_л$, соединение фаз (в мощных генераторах напряжение иногда нестандартно и подлежит выбору, условия выбора оптимального напряжения см. гл. 2).

4. Частота $f$.

5. Коэффициент мощности $\cos\varphi_N$.

6. Скорость вращения $n$.

7. Гарантированный к. п. д.

8. О. к. з. $= \frac{1}{x_d}$ и переходная реактивность $x'_d$ (для генераторов).

9. Маховой момент $GD^2$.

10. Угонная скорость $n_{уг}$.

11. Тип первичного двигателя или привода (турбина, ее тип, дизель, компрессор и т. п.).

12. Конструктивный тип (для гидрогенераторов — зонтичный, подвесной, вертикальный, горизонтальный и т. п., для двигателей — открытый, закрытый, защищенный и т. п.) задается или подлежит выбору.

13. Система вентиляции — замкнутая, протяжная и т. п. (задается или подлежит выбору).

14. Соответствие или отступление от норм (в отношении нагрева, окружающая температура и т. д.).

Примечания: 1. В случае особых требований составляются технические условия для данного типа машины (тип демпферной обмотки, тип возбуждения, система возбуждения и пр.).

2. Допуски на заданные значения к. п. д., о. к. з., $x'_d$ и $GD^2$ в соответствии с нормами или по согласованию с заказчиком.

3. Для двигателей задаются дополнительно пусковые условия (кратность пускового тока, пускового, максимального и входного моментов, число пусков в единицу времени) и график рабочего режима.

15. Число полюсов

$$2p = 2\frac{f}{n}.$$

16. Инерционная постоянная

$$T_i = \frac{1}{4} \frac{GD^2\omega_N^2}{P_N}.$$

Конструктор должен убедиться, что требуемые заказчиком параметры и условия являются вполне целесообразными и обоснованными с экономической точки зрения. Иногда требования заказчика основаны на распространенных, но не всегда прогрессивных рекомендациях. Например, при заказе может быть задан завышенный маховой момент (исходя из заниженной допустимой величины повышения скорости вращения при сбросе нагрузки) или завышенные величины о. к. з. и к. п. д., перегрузочной способности, потолка и скорости нарастания напряжения, чрезмерно высокие требования в отношении минимума переходной реактивности и т. п. Конструктор обязан сравнить задаваемые величины с подобными величинами близких по конструкции и удовлетворительно работающих машин, с требованиями норм, уточнить проектное задание в отношении

требуемых рабочих свойств машины, особенностей конструкции, системы вентиляции, обслуживания, системы регулирования, величины напряжения и т. п. Номинальные линейные напряжения: генераторов 230/400, (525), 3150, 6300, 10 500, (13 800), 15 750, (18 000); двигателей 220/380, (500), 3000, 6000, 10 000, (13 000) *в*.

Иногда наиболее рациональное напряжение должно быть определено в результате проектирования. В крупных машинах, работающих в блоке с трансформатором, напряжение может быть не стандартным.

*Целесообразно в начале расчета сопоставить заданный к. п. д. с к. п. д. близких по конструкции, мощности и скорости вращения машин и оценить величины ожидаемых потерь.*

Сумма потерь при номинальном режиме

$$\sum p = P_{2N}\frac{1-\eta_N}{\eta_N}.$$

Для генераторов $P_{2N} = P_N \cos\varphi_N$.

Для двигателей $P_{2N} = P_N \cos\varphi_N \eta_N$.

Механические потери (на трение и вентиляцию) в процентах от $P_{2N}$

$$p_m = k_m\sqrt[3]{\frac{n}{100}}\sqrt[4]{\frac{1000}{P_{2N}}}\ \%,$$

где $n$ — скорость вращения, об/мин;

$P_{2N}$ — номинальная мощность, *квт*.

| Тип машины | $k_m$ |
|---|---|
| Гидрогенератор подвесной | 1,5 |
| Гидрогенератор зонтичный | 3 |
| Турбогенератор с воздушным охлаждением | 0,8—0,9 |
| Турбогенератор с водородным охлаждением | 0,2—0,25 |
| Явнополюсная горизонтальная машина | 0,4—0,6 |

Допустимые добавочные потери даны в § 2-3.

Сумма основных потерь в железе и меди

$$p_{Cu1} + p_f + p_{Fe} = \sum p - p_m - p_{доб} = \sum p''.$$

Оптимальное отношение потерь в меди ротора и статора по [85]

$$k_{21} = \frac{p_f}{p_{Cu1}} = \frac{c_f}{x_{ad}} \approx 0{,}7\sqrt{\left(\frac{1{,}1}{x_d}\right)^2 + 1 + \frac{2{,}2}{x_d}\sin\varphi_N} \approx 0{,}7M_{max},$$

где $M_{max}$ — статическая перегружаемость.

Отношение основных потерь в меди и в железе $\xi = \frac{p_{Cu1}}{p_{Fe}}$ (ориентировочно):

| Тип машины | $\xi$ |
|---|---|
| Гидрогенератор | 0,6—0,7 |
| Крупный турбогенератор | 0,3—0,4 |
| Средний » | 0,5—0,7 |
| Мелкий » | 0,7—1,0 |
| Крупная синхронная явнополюсная машина | 0,8—1 |
| Средняя » » » | 1 —1,5 |
| Мелкая » » » | 1,5—2 |



Потери в меди статора

$$p_{Cu1} = \frac{\sum p - p_m - p_{доб}}{(k_{21}+1) - \frac{1}{\xi}}.$$

Потери в железе

$$p_{Fe} = \frac{p_{Cu1}}{\xi}.$$

Потери на возбуждение

$$p_f = p_{Cu1}k_{21}.$$

Суммарные электрические потери в долях от $P_{2N}$ приблизительно по § 2-3.

$$\frac{\sum p''}{P_{2N}} = \sum p^{*\prime\prime} = k_{эл}\left(\frac{2p}{P_{2N}}\right)^{\frac{1}{4}},$$

где для многополюсных гидрогенераторов $k_{эл} \approx 0{,}55 \div 0{,}65$ и для турбогенераторов и синхронных машин $k_{эл} \approx 0{,}9 \div 1$; $P_{2N}$ — *вт*.

## 12-9. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ

В гл. 2 рассмотрены общие замечания по выбору оптимальных размеров электрических машин и трансформаторов. Там же показано, что невозможно сразу выбрать наилучшие размеры машины и что наиболее правильным является расчет нескольких различных конструктивных вариантов. Однако можно значительно ограничить количество вариантов, если использовать рекомендации, удовлетворяющие основным принципам проектирования и установленные опытом и теорией. Некоторые из этих основных принципов изложены в гл. 1 и 2. Среди них главными являются следующие:

а) минимальный расход материалов при достаточно высоком к. п. д.;

б) минимальные расходы при изготовлении машин;

в) обеспечение требуемых электрических и механических параметров и рабочих свойств;

г) удовлетворение нормам нагрева, а также электрической и механической прочности.

Основной метод определения размеров состоит в том, что сначала определяются ориентировочные значения размеров, а затем эти размеры проверяются, исходя из заданных требований. В частности, полученные размеры можно при желании округлить до нормалей или серийных габаритов, а также в случае необходимости использовать имеющиеся штампы.

1. Крупные гидрогенераторы.

*Метод универсальной машинной постоянной.*

Универсальная постоянная

$$C_s = (k_w k_\varphi s B_z)^{-\frac{1}{4}}$$

изменяется для всех машин в узких пределах: (3,5 ÷ 4,5) $см \cdot дж^{-1/4}$.

Полюсное деление

$$\tau = C_s \left( \frac{P_N \beta^3}{2pf\sqrt{2}\lambda_1} \right)^{\frac{1}{4}} см.$$

Диаметр расточки

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} см.$$

Если ориентировочно принять $k_w = 0{,}92$, коэффициент заполнения зубцовой зоны в среднем

$$k_\varphi = \lambda\varphi_{Cu}\zeta\varphi_{Fe} = 0{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}8 \approx 0{,}1,$$

плотность тока в статоре $s = 250$ *а/см²* (2,5 *а/мм²*), среднюю индукцию в зубцах $B_z = 1{,}7$ *вб/м²*, то

$$C_s = (0{,}92 \cdot 0{,}1 \cdot 250 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-4})^{-1/4} \approx 4.$$

Для различных машин в табл. 79 даны коэффициенты заполнения $\varphi_{Cu}$, полные коэффициенты заполнения $k_\varphi$ и универсальные машинные постоянные.

*Таблица 79*

**Универсальная машинная постоянная и коэффициенты заполнения**

| Линейное напряжение (в *в*) | $\varphi_{Cu}$ | $k_\varphi$ | $C_s$ (в *см·дж*) $^{-1/4}$ |
|---|---|---|---|
| 400 (380), 525 (500) | 0,4 —0,6 | 0,08—0,10 | 3,35—3,5 |
| 3150 (3000) | 0,3 —0,4 | 0,06—0,08 | 3,5 —3,7 |
| 6300 (6000) | 0,25—0,35 | 0,04—0,07 | 3,7 —4,0 |
| 10 500 (10 000), 13 800 | 0,2 —0,3 | 0,03—0,04 | 4,1 —4,4 |

Отношение $\beta = \frac{\tau}{l_i}$. В гл. 2 рассмотрен вопрос о выборе наивыгоднейшего отношения полюсного деления к длине машины. Область оптимальных значений $\beta$ приведена на рис. 262. Для мощных гидрогенераторов приходится идти на уменьшение $\beta$ до 0,25 и меньше, чтобы не получить недопустимо больших диаметров и полюсных делений. Максимальную величину полюсного деления можно получить из условий угонной скорости. Пусть $k_{уг} = \frac{n_{уг}}{n_N}$ задано в зависимости от типа турбины ($k_{уг} = 1{,}8 \div 2$ и $2{,}8 \div 3$, § 12-1). Максимально допустимая окружная скорость для шихтованных роторов $v_{уг} = 130$ *м/сек*, а для роторов из целых дисков $v_{уг} = 160$ *м/сек*. Отсюда получаем:

$$\tau_{max} = \frac{v_{уг}\,(м/сек)}{k_{уг}};$$

$$D_{max} = \frac{2p\tau_{max}}{\pi} = \frac{2pv_{уг}(м/сек)}{\pi k_{уг}}\ см.$$

Необходимо, чтобы $\tau < \tau_{max}$.



Величина $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$, характеризующая относительную глубину паза, определена в гл. 2. Для явнополюсных машин величину $\lambda_1$ выбираем согласно рис. 261.

Окончательно выбрать $\beta$, $D$, $\tau$ и расчетную длину машины $l_i = \frac{\tau}{\beta}$ можно только после выбора типа обмотки и целесообразного раскроя жестей (сегментировка) с минимумом отходов.

*Метод машинной постоянной $C_A$.* Для крупных машин машинная постоянная Арнольда (гл. 1)

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_w B_{\delta 1} A} = \frac{D^2 l_i n}{P_N}$$

или коэффициент использования

$$K_A = \frac{1}{C_A}$$

стремятся к пределу (см. рис. 263), так как индукция в зазоре $B_{\delta_1}$ и линейная нагрузка $A$ стремятся к предельным значениям (рис. 264 и 265).

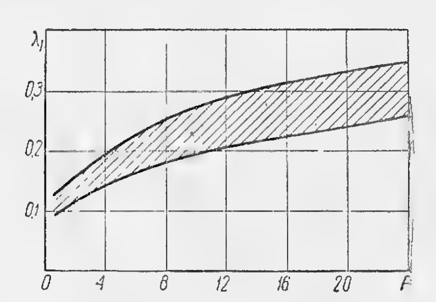



Рис. 261. Коэффициент глубины паза для явнополюсных машин.

Выбирая, например, $B_{\delta_1} = 0{,}85 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²* (8500 *гс*), $A = 600$ *а/см* и задаваясь $k_w = 0{,}92$, получим

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}85 \cdot 10^{-4} \cdot 600} = 3{,}03\ см^3 \cdot дж^{-1}$$

$$\left(или\ \ 3{,}03 \cdot 60 \cdot 1000 = 18{,}1 \cdot 10^4 \frac{см^3}{квт\ мин}\right);$$

$$K_A = \frac{1}{C_A} = 0{,}33 \frac{дж}{см^3}.$$

Так как мощность $P_N$, скорость вращения и число полюсов заданы, то, вводя отношение

$$\frac{D}{l_i} = \frac{2p}{\pi}\frac{\tau}{l_i} = \frac{2p}{\pi}\beta,$$

получаем

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_N}{n_N}\frac{2p\beta}{\pi} C_A}, \qquad (10а)$$

где $\beta$ находится так же, как и в первом методе.

*Учет задаваемого махового момента $GD^2$ при выборе диаметра.* Методы выбора диаметра, указанные выше, как правило, обеспечивают достаточную величину $GD^2$. В случае, если $GD^2$ окажется недостаточным, то в определенных пределах можно получить необходимую его величину, не изменяя диаметр, за счет увеличения веса обода. Величина $GD^2$ задается гидротехниками из условий повышения скорости при сбросе нагрузки весьма приближенно.

Поэтому, если $GD^2$ получится меньше задаваемой величины, то это уменьшение может быть допустимо по согласованию с заказчиком.

Ориентировочно можно проверить возможность получения заданного $GD^2$ по формуле

$$D^4 l > \frac{GD^2\ (\text{заданный})}{K}\ тм^2, \qquad (10б)$$

где $D$ и $l$—диаметр расточки и полная активная длина в метрах; $K \approx 2$ для $D > 5$ *м* и $K \approx 3$ для $D < 5$ *м*.

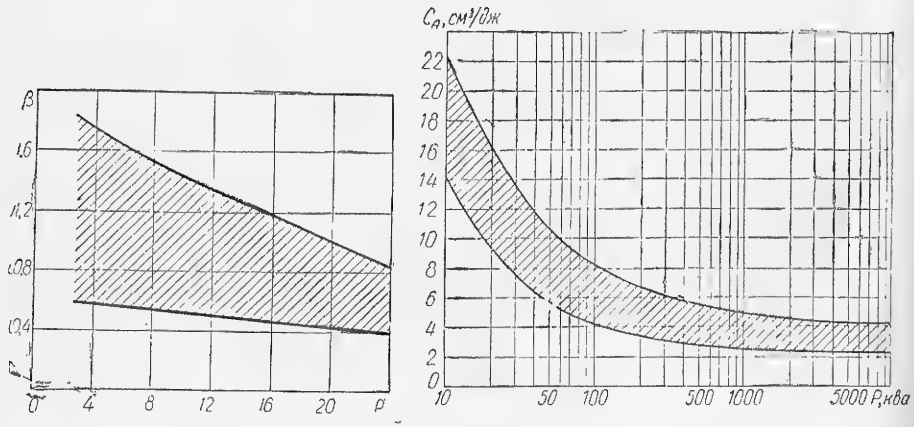



Рис. 262. Коэффициент геометрии полюса для явнополюсных машин.

Рис. 263. Постоянная Арнольда для явнополюсных машин.

2. Нормальные явнополюсные машины $f_1 = 50$ *гц* (генераторы и двигатели малых, средних и больших мощностей, синхронные компенсаторы, дизель-генераторы и т. п.).

Для этих машин угонная скорость составляет 1, 2 от $n_N$. Основные размеры $D$ и $l_i$ при заданной мощности и скорости вращения предварительно определяются так же, как и для гидрогенераторов.

*Метод универсальной машинной постоянной* $C_s$. Здесь величину $\lambda_1$ следует брать согласно рис. 261. Больший предел выбирается для крупных и высоковольтных машин, меньший — для низковольтных. Пределы $C_s$ остаются те же, т. е. $3{,}5 \div 4{,}5$. Величина $\beta$ определяется по формуле (55) гл. 2. Для нормальных средних и крупных машин желательно, чтобы длина лобовой части витка была равна длине активной части, при этом $\beta \approx 0{,}65 \div 0{,}7$, иногда до $0{,}9 \div 1{,}5$.

Для мелких машин по условию размещения обмотки возбуждения приходится увеличивать $\beta$ до 1,5, а иногда и до 2, в мелких обращенных (внутриякорных) машинах $\beta = 1 \div 1{,}2$. При проектировании серии машин при одном диаметре получается две, три разных длины. Поэтому в этом случае будут «длинные» и «короткие» машины, то есть величины $\beta$ большие и меньшие оптимального значения.



На рис. 262 приведена область значений коэффициента $\beta$ в функции числа пар полюсов, полученная на основании анализа построенных явнополюсных машин. При выборе величины $\beta$ в пределах, указанных на рис. 262, получаем машину с удовлетворительными параметрами и достаточно экономичную.

*Метод машинной постоянной* $C_A$. Величину $C_A$ определяем по кривым рис. 263, построенным на основании анализа построенных машин. На рис. 264 и 265 даны также кривые $B_{\delta_1}$ и $A$, по которым можно определить $C_A$.

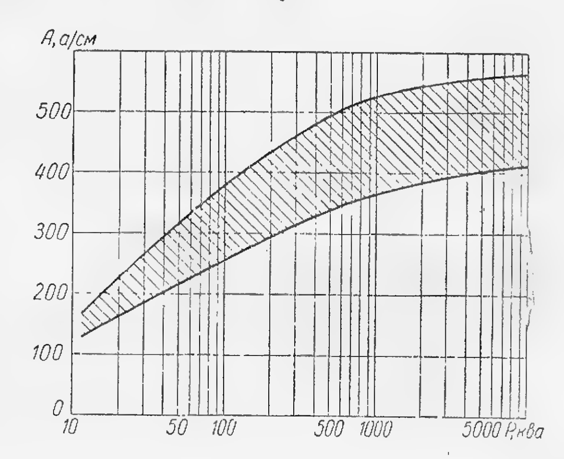



Рис. 264. Линейные нагрузки для явнополюсных машин.

Пределы величин $C_A$, $A$ и $B_{\delta_1}$, приведенные на рис. 263, 264 и 265, справедливы для построенных машин с умеренным использованием активных материалов. В отдельных случаях при интенсивной вентиляции или более теплостойких материалах величины $A$ и $B_{\delta_1}$ могут быть повышены и $C_A$ соответственно понижена.

Предварительно диаметр определяется по формуле (10 а). Отношение $\beta$ определяется так же, как и при пользовании величиной $C_s$.

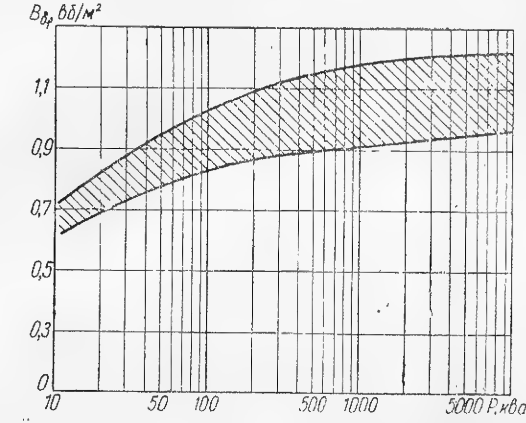



Рис. 265. Индукции в воздушном зазоре для явнополюсных машин.

Полученный диаметр и полюсное деление необходимо проверить так же, как и выше для гидрогенераторов, на угонную скорость. Значение $n_{уг}$ здесь равно $1{,}2 n_N$, а пределы $v_{уг}$ можно принять $(130 \div 160)$ *м/сек*.

*Учет требуемого махового момента.* При проектировании дизель-генераторов, компрессорных двигателей и др. необходимо обеспечить определенную величину $GD^2$, чтобы не было резонанса. Проверить возможность получения необходимого $GD^2$ можно по формуле (10 б). Если при этом получается нежелательно большая величина диаметра, то целесообразно установить отдельный маховик или конструктивно увеличить вес обода.

*Внешний диаметр.* По полученному диаметру расточки ориентировочно определяют внешний диаметр якоря

$$D_{j1} \approx D + (1 \div 1{,}2)\,\tau \approx D\left[1 + \frac{(1 \div 1{,}2)\,\pi}{2p}\right].$$

При $D_{j1} < 99$ *см* железо статора собирается из целых дисков, при $D_{j1} > 99$ *см* приходится штамповать сегменты. Во всех случаях необходимо учесть возможность использования готовых штампов и нормалей на внешние диаметры (приложение I).

Если желаемый внешний диаметр $D_{j1}$ значительно отличается от полученного выше, то нужно пересчитать величины $D$ и $\tau$, исходя из выбранного значения, то есть

$$D = \frac{D_{j1}}{1 + \frac{(1 \div 1{,}2)\,\pi}{2p}} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{\pi D}{2p}.$$

Величины внешнего и внутреннего диаметров окончательно утверждаются только после выбора типа обмотки, числа пазов и целесообразного раскроя сортовой стали с минимумом отходов. В отдельных случаях эти величины окончательно принимаются после конструктивно-технологической разработки и экономических расчетов.

## 12-10. РАЗМЕРЫ ПАЗА СТАТОРА

При выбранной линейной нагрузке $A$ и плотности тока $s$ (рис. 266) высота паза ориентировочно

$$h_{п} = \frac{A}{s\varphi_{Cu}\lambda},$$

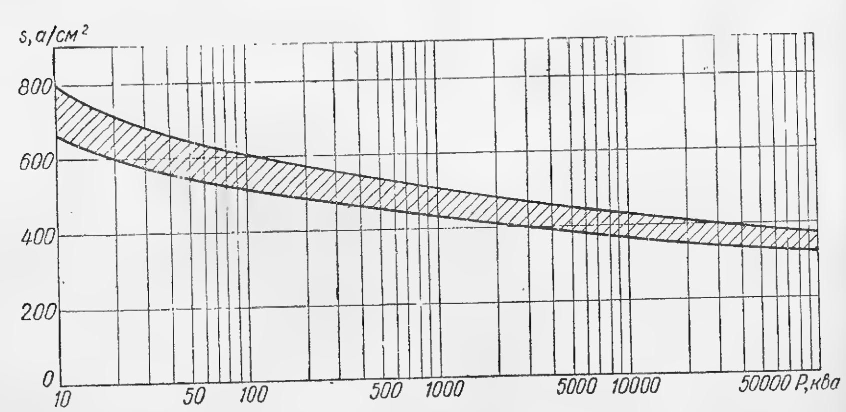



Рис. 266. Плотности тока в обмотке статора для явнополюсных машин.

где $\lambda = \frac{b_{п}}{t_1}$ — выбирается в пределах $0{,}4 \div 0{,}5$;

$\varphi_{Cu}$ — по табл. 79.



Из экономических и эксплуатационно-технических условий

$$h_{п} = \lambda_1 \tau,$$

где $\lambda_1$ — по рис. 261.

Окончательная высота определяется после укладки обмотки.

Ширина паза статора

$$b_{п} = \frac{h_{п}}{\lambda_2},$$

где $\lambda_2 = 7 \div 9$ для крупных турбогенераторов и для крупных гидрогенераторов и $\lambda_2 = 3 \div 6$ для машин малой и средней мощности.

По перепаду температуры в изоляции паза $\theta_i$

$$b_{п} \leq \frac{\theta_i}{a},$$

где

$$a = \frac{s^2 \rho \varphi_{Cu}\, \Delta_i}{2k_i}.$$

Обычно для высоковольтных машин $\theta_i = 25 \div 30°$ C.

Односторонняя толщина пазовой изоляции зависит от напряжения машины (приложение V).

Для изоляции класса $B$ коэффициент теплопроводности $k_i = 0{,}0017$ *вт/см °C*, для изоляции класса $A$ $k_i = 0{,}0012$ *вт/см °C*. Окончательно ширина паза определяется после укладки обмотки.

Последняя формула служит также для проверки выбранной плотности тока по нагреву, то есть

$$s \leq \sqrt{\frac{\theta_i 2k_i}{\rho \varphi_{Cu} \Delta_i b_{п}}},$$

причем

$$\rho = \rho_0 \frac{235 + \theta}{235},$$

где

$$\rho_0 = 1{,}65 \cdot 10^{-6} \text{ ом см}.$$

## 12-11. ВЫБОР ОБМОТКИ СТАТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПАЗОВ

Наиболее распространенными типами трехфазных обмоток являются двухслойные катушечные петлевые обмотки с относительно большим числом витков в катушке и двухслойные стержневые волновые обмотки с двумя стержнями в пазу. Стержни обычно сплетены (рис. 37) из частичных проводников и имеют общее сечение до 1000 *мм²* и ток на стержень до 2500 *а* и выше.

Оба типа обмоток выполняются с сокращенным шагом до 0,8 от полюсного деления с целью уменьшения потерь от высших гармонических.

Двухслойные катушечные обмотки (приложение V) наматываются из изолированных прямоугольных проводников поперечным сечением 12—15 *мм²*. При больших сечениях проводник составляется из 2, 3, 4 и более параллельных проводников. Ток в таком составном проводнике общим сечением до 60 *мм²* может быть до 200 *а*. При

фазных токах 400—800 $a$ и выше приходится делать обмотку из нескольких параллельных ветвей. Иногда параллельные ветви применяются и при токах 200 $a$ и меньше, так как это уменьшает потери в меди от вихревых токов. Однако при значительном числе параллельных ветвей необходимо большое количество перемычек, что вызывает дополнительный расход меди и уменьшает надежность машины. Это основной недостаток катушечной петлевой обмотки.

В крупных высоковольтных машинах поперечное сечение фазного провода доходит до 400 *мм*² и здесь необходима транспозиция частичных проводников или перекрутка в лобовых частях.

В машинах малых мощностей при низких напряжениях катушечные обмотки могут быть намотаны из круглых проводов (при сечении частичного проводника меньше 5—6 *мм*²). Секции катушечных обмоток могут быть «жесткие» и «мягкие». Жесткие секции имеют витковую и пазовую непрерывную изоляцию (приложение V), выполненную до укладки в пазы; секции проходят процесс компаундирования и опрессовки, получаются жесткими и укладываются обычно в открытые пазы статора. Мягкие секции имеют только витковую изоляцию. Пазовая изоляция укладывается в паз. Секции укладываются в полузакрытые пазы статора (приложение V рис. 1).

Стержневые волновые обмотки с двумя стержнями в пазу (рис. 281) применяются при фазных токах 800 $a$ и выше и при напряжениях 6000 *в* и выше. Прочность витковой изоляции равна пазовой, поэтому эти обмотки очень надежны. Число перемычек в лобовых частях минимально и расход меди меньше, чем при катушечных обмотках.

Выбор типа обмотки целесообразно начинать с предварительного определения количества витков на фазу $w$, сечения фазного проводника $q_ф$, числа параллельных ветвей в фазе $a$, числа пазов $Z_1$ и числа проводов в пазу $s_п$.

1. Число витков на фазу

$$w = \frac{E_ф}{\pi \sqrt{2} k_w f \Phi_1}; \quad E_ф \approx U_{фN}.$$

Ориентировочное значение потока

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l_i B_{\delta_1},$$

где $B_{\delta_1}$ определяется по кривым рис. 265.

2. Сечение фазного провода (фазный провод может быть из нескольких проводов параллельных групп или параллельных стержней)

$$q_ф = \frac{I_N}{s},$$

где $s$ — плотность тока (рис. 266).

3. Возможное число параллельных ветвей $a$ на фазу:

а) для катушечных обмоток

$$a = \frac{I_N}{40}, \quad a = \frac{I_N}{100}, \quad a = \frac{I_N}{200},$$



или

$$a = \frac{q_ф мм^2}{15}, \quad a = \frac{q_ф мм^2}{40}, \quad a = \frac{q_ф мм^2}{80}.$$

Эти значения округляем до ближайших целых чисел;

б) для стержневых обмоток

$$a = \frac{I_N}{1000}, \quad a = \frac{I_N}{1500}; \quad a = \frac{I_N}{3000},$$

или

$$a = \frac{q_ф мм^2}{500}, \quad a = \frac{q_ф мм^2}{1000}, \quad a = \frac{q_ф мм^2}{1500}.$$

Окончательно числа параллельных ветвей $a$ определяются после выбора числа пазов и типа обмотки.

4. Число пазов $Z_1$. От правильности выбора числа и размеров пазов во многом зависят качества машины. Правильное решение часто может быть найдено только путем параллельного расчета нескольких вариантов. Должны быть приняты во внимание многочисленные технологические и электротехнические условия, например, следующие: 1) чрезмерно большое число пазов (мелкий шаг паза $t_1$) приводит к большой затрате пазовой изоляции, меньшей механической прочности зубца; 2) чрезмерно малое число пазов (большой шаг паза) приводит к большим токам в пазу, к увеличению потерь от зубцовых гармоник и потерь на вихревые токи в меди, к ухудшению теплоотдачи; 3) число пазов на полюс и фазу должно быть выбрано с учетом экономичности и удобства изготовления обмотки. Ниже показан учет некоторых условий: 1) ориентировочный выбор по допустимому шагу паза $t_1$

$$Z_1 = \frac{\pi D}{t_1}.$$

Шаг паза

$$t_1 = \frac{b_п}{\lambda},$$

где $\lambda = \frac{b_п}{t_1}$; $\lambda = 0{,}35 \div 0{,}5$; $b_п$ определяется по § 12-10.

Шаг паза $t_1$ для малых машин — $1{,}5 \div 2$, для средних машин — $2{,}5 \div 4$ и для крупных машин — $5 \div 7{,}5$ *см*;

2) уточненный выбор по возможности выполнения обмотки. Число пазов на полюс и фазу $q = \frac{Z_1}{2pm}$ (при $m = 3$, $q = \frac{Z_1}{6p}$) может быть целым или дробным. При $q > 4$ предпочтительнее $q$ равные целому числу. В крупных многополюсных машинах (тихоходных) число пазов на полюс и фазу получается малым и часто его приходится делать дробным для уменьшения зубцовых гармонических э. д. с. Выбор дробности ($q = b + \frac{c}{d}$, где $b$ — целое число, а $\frac{c}{d}$ — несократимая дробь) представляет собой задачу большой важности, так как от этой величины зависят рабочие свойства и экономичность обмотки.

Рекомендуется исходить из следующих условий.

Условие симметрии.

$\frac{Z_1}{3t}$ — целое число; $t$ — общий наибольший делитель чисел $Z_1$ и $p$.

Условия дробности.

По Касьянову [62, 64] $q \geqslant 1\frac{1}{2}$ $\left(\text{иногда } q \geqslant 1\frac{1}{4}\right)$; $3q = K \pm \frac{d-1}{2d}$ при $d$ — нечетном; $3q = K \pm \frac{d-2}{2d}$ при $d$ — четном ($K$ — целое число); число $d$ не должно быть кратным 3 и $\frac{2p}{ad}$ равно целому числу.

По Ипатову [45] желаемая дробность из условия минимума перемычек в волновых обмотках

$$q = b + \frac{c}{d}, \quad c = \frac{nd \pm 1}{3}, \quad n = 1 \text{ или } n = 2.$$

Для ряда значений $d$ при $n = 1$ и $n = 2$ получаем соответствующие ряды $q$ (табл. 80).

*Таблица 80*

**Дробная часть $q$**

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $d$ | 4 | 5 | 7 | 8 | 11 | 13 | 14 | 16 | 17 | 19 | 20 | 22 | 23 | 25 | 26 | 28 | 29 |
| $c$ | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 10 |
| | 3 | 3 | 5 | 5 | 7 | 9 | 9 | 11 | 11 | 12 | 13 | 15 | 15 | 17 | 17 | 19 | 19 |

### Условия удобной сегментировки статорного железа

Железо статора с внешним диаметром $D_{j_1} > 99$ *см* собирается из отдельных сегментов (рис. 283), штампованных из листовой электротехнической стали. При расчете надо предусмотреть рациональный раскрой стали, количество пазов на один сегмент и возможность разъема статора.

Число пазов должно разлагаться на возможно большее количество простых множителей (2, 3, 5). Простые множители 17, 19, 23 ... нежелательны, так как усложняют сегментировку и условия разъема статора. Правильно выбирать сегменты можно только при расчете нескольких вариантов.

Для наилучшего использования площади нормальных листов электротехнической стали (приложение II) желательно, чтобы большая хорда сегмента не выходила из пределов 37, 42, 49, 74, 85 и 99 *см*.

При этом получаем число сегментов по окружности

$$n_{сег} = \frac{\pi D_{j_1}}{37;\ 42;\ 49;\ 74;\ 85;\ 99}.$$

Число пазов в сегменте

$$n_z = \frac{Z_1}{n_{сег}}$$

должно быть целым числом (так как желателен разъем по середине паза) и обычно кратным трем.



Составив таблицу вариантов, находят наилучший вариант по условиям разъема статора на 2, 3, 4, 6 и 12 частей в зависимости от величины диаметра. Машины с диаметром до 3,5 ÷ 4 *м* можно выполнять неразъемными.

Если $t_с$ — общий наибольший делитель чисел $2p$ и $N_с$, где $N_с$ — число плоскостей стыка $\left(N_с = \frac{n_{сег}}{\varphi_с} \text{ или } N_с = 2n_{сег} \text{ при } \varphi_с = \frac{1}{2}\right)$, то желательно, чтобы $\frac{2p}{t_с}$ было нечетным с точки зрения трансформаторных подшипниковых токов [65]. Здесь $\varphi_с$ — угол перекрытия сегментов, выраженный в долях сегментного угла $\left(\varphi_с = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}\right)$ и зависящий от числа клиньев на один сегмент; при двух клиньях $\varphi_с = \frac{1}{2}$, при трех $\varphi = \frac{1}{3}$ (рис. 283 и 296). Стыки статора должны проходить не через ласточкины клинья сегментов, а в промежутке между ними.

5. Максимально возможное число параллельных ветвей

$$a_{max} = \frac{2p}{d}.$$

$$a_{max} = t, \text{ если } \frac{Z_1}{3t} \text{ — нечетное число;}$$

$$a_{max} = 2t, \text{ если } \frac{Z_1}{3t} \text{ — четное число}$$

($t$ — общий наибольший делитель чисел $Z_1$ и $p$).

## 12-12. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ОБМОТКИ, ПОСТРОЕНИЕ ЗВЕЗДЫ ВЕКТОРОВ ИЛИ ТАБЛИЦЫ ПАЗОВ

В обмотках с $q$ = ц. ч. (целое число), или «целых обмотках» схему составить просто, так как фазные зоны верхнего слоя чередуются через каждые $q$ пазов. Число лучей звезды пазов, несовпадающих по фазе,

$$Z_0 = \frac{Z_1}{p} = \text{ц. ч.}, \quad q = \frac{Z_1}{6p} = \text{ц. ч.}$$

Построение звезды пазов здесь не является необходимым.

В обмотках с $q \neq$ ц. ч., или «дробных обмотках», число пазов э. д. с. которых не совпадает по фазе

$$Z_0 = \frac{Z_1}{t}; \quad q = \frac{Z_1}{6p} = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d} \neq \text{ц. ч.},$$

где $t$ — общий наибольший делитель $Z_1$ и $p$.

Для образования симметричной трехфазной обмотки необходимо

$$\frac{Z_0}{3} = \text{ц. ч.}$$

Угол между соседними лучами звезды пазов

$$\alpha = \frac{360}{Z_0} = \frac{360}{Z_1}t; \quad p_0 = \frac{p}{t}.$$

Угол между векторами э. д. с. двух соседних пазов

$$\beta = \frac{360}{Z_0} p_0 = \frac{360}{Z_1} p = \frac{180}{mq} = \alpha \frac{p}{t}.$$

Чтобы составить схему, необходимо определить *числовой ряд* обмотки, то есть порядок следования фазных зон по окружности якоря. В целых обмотках, например, при $q = 3$ фазные зоны отдельных фаз верхнего слоя чередуются через три паза.

При диаметральной обмотке фазные зоны нижнего слоя находятся в тех же пазах, а при сокращенном шаге зоны нижнего слоя смещены относительно верхнего слоя на величину сокращения (или удлинения) шага. Если обмотка дробная, например при $q = 2^1/_2$, фазные зоны чередуются по два и по три паза, образуя последовательность или числовой ряд. Число членов числового ряда равно знаменателю дробности $d$. Через $d$ членов ряд повторяется, то есть через каждые $d$ полюсов обмотка повторяется.

Во многих случаях ряд находится сразу. Например, для $q = 2^1/_2$ ряд будет 2, 3, 2, 3 и т. д., для $q = 1^3/_4$ ряд 2,2,1,2, и т. д., то есть в соответствии с выражением

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d}$$

ряд будет содержать $c$ пазов по $q = b + 1$ и $d - c$ пазов по $q = b$. Сумма членов ряда равна $N$. Следовательно, обмотка будет повторяться через каждые $N$ пазов и $d$ полюсов. Число пазов на $d$ полюсов равно $3N$. В более сложных случаях ряд определяется путем построения звезды векторов или таблицы пазов. Шаг вектора в звезде векторов

$$y_v = \frac{kZ_0 \pm 1}{p_0},$$

где $k$ — минимальное целое число, при котором $y_v$ получится целым (обычно берется знак $+$). Для сокращения числа векторов вместо $q = b + \frac{c}{d}$ можно построить звезду для $q' = \frac{c}{d}$ и соответственно для $Z_0 = 6q'p_0$ и определить для нее исходный числовой ряд. Тогда ряд для $q = b + \frac{c}{d}$ определяется прибавлением числа $b$ ко всем членам исходного ряда.

Пусть, например, дана обмотка с $Z_0 = 186$, $p_0 = 13$, $q = \frac{186}{6 \cdot 13} = 2\frac{5}{13}$.

Построим звезду или таблицу для $q' = \frac{c}{d} = \frac{5}{13}$, $Z'_0 = 6q'p_0 = 30$.

Шаг вектора в звезде пазов

$$y_v = \frac{kZ'_0 \pm 1}{p_0} = \frac{3 \cdot 30 + 1}{13} = 7$$

(в данном случае $k = 3$).

Составляем числовой ряд 13 членов для $q' = ^5/_{13}$. Ряд содержит 13 членов 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0. Для $q = 2\frac{5}{13}$ ряд получается прибавлением ко всем членам ряда целого числа 2, то есть 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 2 ...



По [45] числовой ряд может быть найден так: составляется таблица из $d$ столбцов и $c$ строк. В первый столбец вписывается $c$ раз число $b + 1$, во второй и все последующие вписывается подряд $d - c$ раз число $b$ и $c$ раз число $b + 1$. Например, для $q = 2\frac{5}{8}\left(b = 2,\ c = 5,\ d = 8\right)$ получаем

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3, | 2, | 3, | 2, | 3, | 3, | 2, | 3 |
| 3, | 2, | 3, | 3, | 2, | 3, | 2, | 3 |
| 3, | 2, | 3, | 3, | 2, | 3, | 3, | 2 |
| 3, | 3, | 2, | 3, | 2, | 3, | 3, | 2 |
| 3, | 3, | 2, | 3, | 3, | 2, | 3, | 2 |

Числовой ряд определяется по любой из полученных $c$ строк.

Составление схемы.

Шаг секции

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p} \pm \varepsilon \text{ — целое число.}$$

Полюсное деление в пазах

$$\tau_{\text{п}} = \frac{Z_1}{2p} = mq.$$

Относительный шаг

$$y = \frac{y_1}{\tau_{\text{п}}} = \frac{y_1}{mq}$$

(наивыгоднейшее значение $y \approx 0{,}8$, так как при этом получается минимум гармонических м. д. с.).

В петлевых обмотках обычно $y = 0{,}8 - 0{,}85$, в волновых обмотках может быть применен как сокращенный, так и удлиненный шаг, например $y = 1{,}2$, эквивалентный $y = 0{,}8$.

Коэффициент обмотки

$$k_w = k_y k_{\text{р}}; \quad k_y = \sin(90^\circ \cdot y); \quad k_{\text{р}} = \frac{0{,}5}{q \sin\left(\frac{30^\circ}{q}\right)};$$

при $q$ дробном $\left(q = b + \frac{c}{d}\right)$ вместо $q$ надо подставить $N = bd + c$.

Для волновых обмоток определяется результирующий шаг обмотки

$$y_{\text{к}} = y_1 + y_2; \quad y_{\text{к}} = \frac{Z_1 \pm m_{\text{х}}}{p}, \qquad \text{(A)}$$

где $m_{\text{х}}$ — число ходов обмотки; выбирается минимальное число, делающее $y_{\text{к}}$ целым. В крупных многополюсных машинах число ходов $m_{\text{х}}$ может быть значительным — 10, 20 и более).

Знак «+» дает правоходовую (перекрещенную) и знак «—» левоходовую (неперекрещенную) обмотку. Выгоднее применять левоходовую обмотку, так как длина лобовых частей, а также расход меди и изоляции получается меньше. Если употребляется знак

«—», то при составлении таблицы векторов надо вычитать шаг вектора

$$y_v = \frac{kZ_0 \pm 1}{p_0}$$

или прибавлять сопряженный шаг

$$y' = Z_0 - y_v.$$

Если выбранные значения $Z_1$ и $p$ не удовлетворяют формуле (А), то может быть применена $m_x$ — ходовая, *искусственно замкнутая волновая обмотка*. Для этого каждый из $m_x$ ходов разрезается на 6 частей и одноименные полуфазы всех $m_x$ ходов соединяются последовательно или параллельно, смотря по надобности.

Для определения количества и местоположения перемычек (междукатушечных соединений) составляют схему с помощью таблицы или звезды векторов [63]. Желательно получить схему с минимальной длиной перемычек.

В петлевых обмотках в каждой фазе и в каждом полюсном делении имеется по одной перемычке между одноименными фазными группами катушек. Длина перемычки равна полюсному делению. Суммарная длина перемычек равна трем окружностям статора. Следовательно, полная длина соединений равна четырем окружностям статора. Большой расход металла на эти соединения является одним из серьезных недостатков петлевой обмотки (в особенности для многополюсных машин). В волновых обмотках число перемычек значительно меньше (в особенности при искусственно замкнутых обмотках). Разработка схемы с минимумом перемычек представляет собой одну из важных конструктивных задач и подробно рассмотрена в ряде работ, например, в [63]. Для уменьшения длины выводных шин волновой обмотки желательно сконцентрировать выводы в одном месте на дуге 1—2 полюсных деления. Число перемычек волновой обмотки равно $6m_x$ или $6m_x - 3a$, где $m_x$ — число ходов обмотки, $a$ — число параллельных ветвей. Общая длина всех прямых и косых перемычек по [63]

$$\left[6Z_1\left(1 - \frac{c}{d}\right) + 18(b+1)\right]t_1,$$

где $t_1$ — зубцовое деление при $q = b + \frac{c}{d}$.

При большом числе пазов составление полной схемы волновой обмотки требует относительно большого труда и времени. В [63] и [45] даны способы рационального построения схем волновых обмоток при больших числах пазов. Составление схем петлевых обмоток более просто и можно составить только часть схемы и таблицу соединений.

Окончательный выбор числа пазов и основных размеров машины утверждается только после составления схемы обмотки, определения размеров паза, укладки обмотки, подсчета активных и реактивных сопротивлений, расчета потерь и нагрева обмотки, то есть, по существу, в самом конце расчета машины.



Иногда окончательный выбор может быть сделан только при технологической разработке машины. В особенности, если речь идет о крупных машинах или о разработке серий машин.

## 12-13. РАЗМЕРЫ МЕДИ, УТОЧНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПАЗА И ЗУБЦА, ПЛОТНОСТИ ТОКА И ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

Катушечные петлевые двухслойные обмотки могут состоять из 1, 2, 3, 4... изолированных элементарных параллельных проводников сечением не более 15—16 *мм*² и шириной не более $b = 6{,}4$ *мм*, связанных в один виток общей витковой изоляцией*. Группа из нескольких витков при жестких секциях покрывается пазовой (или корпусной) изоляцией, приложение V, рис. 3 и 5. Суммарная толщина корпусной и витковой изоляции дана в приложении V, табл. 4 и 6.

Двухсторонняя толщина $\Delta$ хлопчатобумажной изоляции определяется меньшим размером проводника $a$: при $a = 0{,}74 \div 1{,}45$ *мм* $\Delta = 0{,}25$ *мм*, при $a = 1{,}56 \div 2{,}10$ *мм* $\Delta = 0{,}30$ *мм*; при $a = 2{,}26$ и выше $\Delta = 0{,}35$. Двухсторонняя толщина асбестовой изоляции во всех случаях равна 0,35 *мм*.

Нормальные размеры обмоточной меди (стороны $a$ и $b$) даны в приложении III. Можно пользоваться основным рядом размеров $a$ и $b$ с коэффициентом нарастания приблизительно 1,08 [64]: 1,00 1,08 1,16 1,25 1,35 1,45 1,56 1,68 1,81 1,95 2,10 2,26 2,44 2,63 2,83 3,05 3,28 3,53 3,80 4,10 4,40 4,70 5,10 5,50 5,90 6,40 6,90 7,40 8,00 8,60 9,30 10.

Большие и меньшие размеры получаются из основного ряда перенесением запятой на одно место вправо или влево. Размеры $a$ и $b$ можно брать в любых сочетаниях. Сечение проводника

$$q_{пр} = (ab - 0{,}25)\ мм^2,$$

где 0,25 — уменьшение сечения вследствие закругления углов.

Расчет производим в следующем порядке:

1. Ориентировочное сечение меди одной параллельной ветви

$$q'_ф = \frac{I_N}{as}, \text{ или } q'_ф = \frac{q_ф}{a}.$$

2. Ориентировочное число элементарных проводников в одной параллельной ветви

$$C = \frac{q_ф}{ab} \approx \frac{q_ф\ мм^2}{16}$$

и округляем до целого числа (при $q'_ф < 16$ *мм*² выбирается $C = 1$, при $q'_ф < 6$ *мм*² выбирается круглый провод).

3. Ориентировочная ширина секции без пазовой изоляции

$$b_{ос} \approx b_п - \Delta_п - 0{,}06\ см,$$

* Для машин малой мощности и с малым числом проводников размеры элементарного проводника могут быть взяты до 30 *мм*². При большом числе проводников сечением меньше 6 *мм*² выбирается круглый провод.

где $b_п$ — ширина паза;

$\Delta_п$ — двухсторонняя толщина пазовой изоляции (приложение V);

0,06 — добавка на неточность при сборке.

Ширина элементарного проводника равна $\frac{b_{ос}}{n}$, где $n$ — число проводников по ширине.

4. Выбираем по сортаменту медь с шириной $b \approx \frac{b_{ос}}{n}$ и определяем точные размеры $b_{ос}$ и $h_{ос}$ с учетом толщины изоляции элементарных проводников.

5. Определяем число активных проводников в пазу

$$s'_п = \frac{w\,a}{pq},$$

округляя до целого числа (четное в случае двухслойной обмотки), и окончательно определяем число витков в фазе

$$w = pq\frac{s'_п}{a} = pq\,s_п.$$

6. Производим укладку проводников, прибавляем размер пазовой изоляции, допуски на неточность изготовления и размер клина ($h_{кл} \approx 0,3b_п$), получаем точные размеры паза. Для этого составляем таблицу, как показано в примерах расчета. Вычерчиваем эскиз паза в масштабе (рис. 281 и 286).

Укладка всыпной обмотки с круглым проводом и мягких секций для полузакрытого паза показана на рис. 1, приложение V.

7. Определяем размеры зубца в различных сечениях:

$$b_{z1} = \frac{\pi D}{Z_1} - b_п;$$

$$b_{z12} = \frac{\pi(D + h_п)}{Z_1} - b_п = b_{zср};$$

$$b_{z13} = \frac{\pi(D + 2h_п)}{Z_1} - b_п.$$

8. Уточняем плотность тока, линейную нагрузку и коэффициент заполнения:

$$s = \frac{I_N}{q_ф};\quad A = \frac{I_N s'_п}{at_1};\quad \varphi_{Cu} = \frac{s'_п q_ф}{ah_п b_п}.$$

Стержневые волновые обмотки рассчитываются аналогично вышеприведенному, однако необходимо учесть при определении высоты одного стержня $h_{ос}$ добавочное место, по высоте равное толщине $a'$ изолированного элементарного проводника, необходимое при переплетении (рис. 281). Поэтому

$$h_{ос} = a'\left(\frac{c}{n} + 1\right).$$

Число проводников в пазу получается обычно $s'_п = 2$. Число последовательно соединенных проводников в пазу

$$s_п = \frac{s'_п}{a}.$$



## 12-14. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НОМИНАЛЬНОГО ПОТОКА, ДЛИН ЖЕЛЕЗА И ЧИСЛА ПАКЕТОВ. ВЫСОТА ЯРМА

1. Поток

$$\Phi_1 = \frac{E_ф}{\pi\sqrt{2}k_w f\,w},$$

где $E_ф \approx U_{фN}$.

Эта величина соответствует основной волне потока холостого хода. При нагрузке поток увеличивается на 5—8%. Весь расчет ведем для номинального потока холостого хода.

2. Расчетная длина получается из равенства

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi}\tau l_i B_{\delta 1},$$

где $B_{\delta_1}$ определяется по рис. 264, то есть

$$l_i = \frac{\pi}{2}\frac{\Phi}{\tau B_{\delta_1}}.$$

Эта величина сравнивается с предварительно выбранной длиной $l_i$.

3. Ширина пакета при радиальной вентиляции из условий нагрева $l'_1 = 5;\ 4,5;\ 4;\ 3,5$ *см*.

Расчетная длина

$$l_i = l'(n_s + 1) + 0,5n_s b_s,$$

где $n_s$ — число каналов;

$b_s$ — ширина канала (стандартная 1 *см*).

4. Число каналов

$$n_s = \frac{l_i - l'}{0,5\,b_s + l'}$$

округляем до целого числа.

5. Полная длина железа с каналами

$$l = l'(n_s + 1) + n_s b_s.$$

6. Расчетная длина (уточненная)

$$l_i = l'(n_s + 1) + 0,5n_s b_s.$$

При аксиальной вентиляции

$$l = l_i;\ n_s = 0.$$

7. Длина чистого железа

$$l_{Fe} = k_п(l - n_s \cdot b_s),$$

или при равных пакетах

$$l_{Fe} = l'(n_s + 1)\cdot k_п,$$

где $k_п$ — коэффициент проклейки; при толщине листов 0,5 *мм* $k_п = 0,93$, при 0,35 *мм* $k_п = 0,9$.

8. Выбираем марку стали и удельные потери $p_{10}$.

9. Средняя ширина зубца

$$b_{z\,ср} = \frac{\pi(D + h_п)}{Z_1} - b_п.$$

10. Средняя индукция в зубцах

$$B_{z\,ср} = B_{\delta 1} \cdot \frac{t_1}{b_{z\,ср}} \cdot \frac{l_i}{l_{Fe}};$$

$B_{z\,ср} \leqslant 1{,}5$ *вб/м²* в малых машинах и $B_{z\,ср} \leqslant 1{,}7 - 1{,}9$ *вб/м²* в средних и крупных машинах.

Если $B_{z\,ср}$ находится в указанных пределах, то вычисленные длины можно принять как окончательные. Если $B_{z\,ср}$ намного выше указанных величин, следует уменьшить $B_{\delta 1}$ путем увеличения длины железа, оставив $\Phi = \text{const}$; если много меньше, то, наоборот,— уменьшить $l_{Fe}$ и увеличить $B_{\delta 1}$.

11. Находим окончательно высоту ярма и проверяем индукцию в ярме

$$h_j = \frac{D_j - D - 2h_п}{2}; \quad B_j = \frac{\Phi}{2l_{Fe}h_j}.$$

$B_j$ должна быть в пределах 1,3—1,4 *вб/м²* или 13 000—14 000 *гс*.

Если $B_j$ находится в пределах 1,3—1,4 *вб/м²*, то $D_j$ и $h_j$ можно принять как окончательные.

Желательно проверить высоту ярма по экономическим условиям § 2-7

$$\frac{h_j}{h_п} = \frac{\sqrt{\zeta}}{\pi\lambda_1},$$

$$\text{где } \zeta = \frac{b_{z\,ср}}{t_1}; \quad \lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}.$$

## 12-15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ВЕСОВ И ПОТЕРЬ В ЖЕЛЕЗЕ И МЕДИ СТАТОРА

1. Вес зубцов

$$G_z = Z_1 b_{z\,ср} h_п l_{Fe} \gamma_{Fe} \ кг.$$

2. Вес ярма

$$G_j = \pi (D_j - h_i) h_j l_{Fe} \gamma_{Fe}.$$

3. Полный вес железа

$$G_{Fe} = G_z + G_j.$$

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P_N} \ кг/ква.$$

4. Потери в железе

$$p_{Fe} \approx (1{,}7B_{z\,ср}^2 G_z + 1{,}3B_j^2 G_j)\, p_{10} \ вт,$$

где $B_{z\,ср}$ и $B_j$ — индукции, *вб/м²*.

5. Потери в железе в процентах

$$p_{Fe}\,\% = \frac{100\,p_{Fe}}{P_{2N}}.$$

Вычисленные расходы материалов на 1 *ква* и процентные потери при сравнении с построенными машинами данного типа и мощности и дают возможность судить, насколько правильно выбраны обмотка и магнитопровод статора.



6. Средняя длина витка (приближенно)

$$l_w = 2\,[l + (1{,}6 \div 1{,}8)\, y\tau + (2 \div 7)\ см],$$

где 2 *см* — для низковольтных, 7 *см* — для высоковольтных машин (прямолинейная часть лобовых соединений).

7. Активное сопротивление

$$r_1 = k_r \frac{\rho l_w w}{q_ф} \ ом,$$

где $k_r$ — коэффициент вихревых токов; $k_r \approx 1{,}05 - 1{,}2$.

8. Потери в меди

$$p_{Cu1} = 3I^2 l_{w1} r_1 \ вт, \quad p_{Cu1}\,\% = \frac{p_{Cu1}}{P_{2N}}\, 100.$$

9. Вес меди обмотки статора

$$G_{Cu} = \gamma_{Cu} m w l_{w1} q_ф \ кг.$$

10. Вес пазовой изоляции обмотки статора (приближенно)

$$G_i = 0{,}5\, \gamma_i Z_1 \Pi\, \Delta_п l_{w1} \ кг,$$

где $\Pi = 2\,(b_п + h_п - h_{кл})$ — периметр пазовой изоляции;

$\Delta_п$ — двухсторонняя толщина изоляции.

Для микалентной изоляции $\gamma_i \approx 2 \cdot 10^{-3}$ *кг/см³*.

## 12-16. ПРОВЕРКА СТАТОРА НА НАГРЕВ

Согласно ГОСТ 183-55 допускаемая температура обмоток для изоляции класса А $\theta^\circ_{Cu} = 100°\,C$ при температуре входящего воздуха $\theta^\circ_{вх} = 35°\,C$ (перегрев $\theta^\circ = 65°\,C$); для изоляции класса В

$$\theta^\circ_{Cu} = 120°\,C, \quad \theta = 85°\,C \ \text{при} \ \theta^\circ_{вх} = 35°\,C.$$

Температура обмотки статора приближенно определяется следующим методом (гл. 6):

1. Среднее превышение температуры железа:

$$\theta_{Fe} = \frac{w_{Fe} + w_{Cu}}{\alpha_{Fe}}; \quad w_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{\tau D l}; \quad w_{Cu} = \frac{2p_{Cu}}{\pi D l_w}.$$

При радиальной вентиляции

$$\alpha_{Fe} \approx (7 \div 9)\, \tau\, 10^{-4} \left(\frac{4}{l'}\right) \frac{вт}{°C\ см^2},$$

где $l'$ — ширина пакета статора, *см*;

$\tau$ — полюсное деление, *см*.

При аксиальной вентиляции (при наличии дополнительных канавок в спинке статора, рис. 248)

$$\alpha_{Fe} \approx 28 \cdot 10^{-4} \left[0{,}5\,(1 + \sqrt{v_\delta}) + 1{,}7 \frac{D_j}{D}\,(1 + \sqrt{v_j})\right] \frac{вт}{°C \cdot см^2},$$

где $v_\delta$ и $v_j$ — средние скорости воздуха относительно расточки и спинки, определяемые при вентиляционном расчете. Можно задать ориентировочно

$$v_\delta = v_j \approx (0{,}5 \div 0{,}8)\, v_a,$$

где $v_a$ — окружная скорость ротора, *м/сек*.

$\theta_{Fe}$ должно находиться в пределах 25—35° С.

2. Перепад температуры в изоляции паза

$$\theta_i = \frac{p_{Cu}\Delta_i}{Z_1 l_w h_п k_i},$$

где $\Delta_i$ — односторонняя толщина изоляции паза;

$k_i$ — коэффициент теплопроводности;

$k_i = 0{,}001—0{,}0012$ *вт/см° С* для изоляции класса А и $k_i = 0{,}0015—0{,}0017$ *вт/см° С* для изоляции класса В;

$\theta_i$ должно быть в пределах 15—25° С.

3. Превышение температуры меди над температурой входящего воздуха

$$\theta_{Cu} = \theta_{Fe} + \theta_i + \theta_a,$$

где $\theta_a$ — среднее превышение температуры охлаждающего воздуха в машине, зависящее от расхода воздуха $V_a$ *м³/сек*:

$$\theta_a = \frac{1}{2}\,\frac{\Sigma p}{1{,}1 V_a};$$

$$\Sigma p = \frac{1-\eta_N}{\eta_N} P_{2N}\ \textit{квт};$$

$\theta_a$ должно быть в пределах 10—15° С.

4. Температура меди

$$\theta^{\circ}_{Cu} = \theta_{Cu} + \theta^{\circ}_{вх}$$

должна быть ниже норм на $5 \div 10$° С.

5. Требуемый расход воздуха

$$V_a = \frac{1}{2}\,\frac{\Sigma p}{1{,}1\theta_a}.$$

## 12-17. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

Воздушный зазор определяется электромагнитными, технологическими и монтажными требованиями. Необходимо, чтобы о. к. з. было равно заданному и потери от зубцовых гармоник и высших гармоник были в допустимых пределах.

1. Определение эффективного зазора $\delta' = k_C \delta$ по заданному о. к. з.:

$$x_d = (1{,}06 \div 1{,}1)\, x_{ad} = \frac{1}{\text{о. к. з.}},$$

$$x_{ad} = k_d \frac{F_{1N}}{F_{\delta N}} = k_d\,\frac{\mu_0 F_{1N}}{B_{\delta N}\delta'},$$

где $k_d$ определяется по рис. 267.

Отсюда

$$\delta' = k_d\,\frac{\mu_0 F_{1N}}{B_{\delta N} x_{ad}},$$

где $F_{1N}$ — номинальная м. д. с. реакции якоря на полюс:

$$F_{1N} = \frac{1{,}35}{p} k_w w I_N.$$

Кроме того, $x_{ad}$ может быть определен по заданному $M_{max}$, как показано в примере 2.



2. Действительный зазор

$$\delta = \frac{\delta'}{k_C},$$

где $k_C$ — коэффициент Картера; ориентировочно можно принять $k_C = 1{,}1—1{,}15$. Точный расчет $k_C$ дан ниже.

3. Максимальный зазор $\delta_{max}$ у края наконечника (рис. 268) из условий синусоидальности поля выбирают в пределах $(1{,}5—2)\,\delta$.

4. Коэффициент Картера

$$k_C = k_{C1} k_{C2}.$$

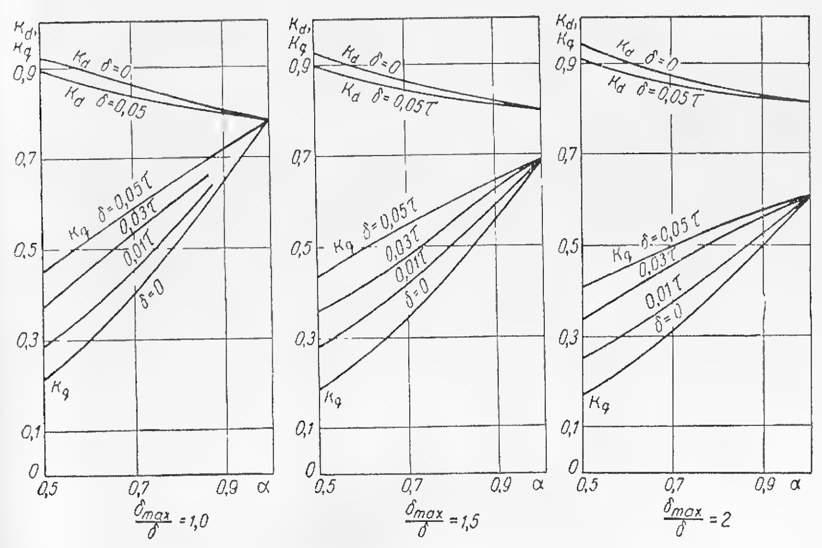



Рис. 267. Коэффициенты $k_d$ и $k_q$ для явнополюсных машин.

Коэффициент, учитывающий зубчатость статора,

$$k_{C1} = \frac{t_1}{t_1 - b_1},$$

где

$$b_1 = b_0\,\frac{b_0}{5\delta + b_0}.$$

Здесь $b_0$ — открытие паза.

Аналогично находится коэффициент $k_{C2}$, учитывающий зубчатость ротора или наличие пазов успокоительной обмотки в явнополюсных машинах.

Проверить размер зазора по условиям потерь от высших гармоник можно после расчета добавочных потерь (гл. 5). Обычно в синхронных машинах величина зазора по условиям о. к. з. получится достаточно большой и потери от высших гармонических получаются в допустимых пределах.

5. Иногда о. к. з. не задается; в этом случае воздушный зазор определяется по технологическим и монтажным условиям на основе опыта построенных машин [64]:

$$\delta \geqslant 0{,}15\,(1 + D^2 \cdot 10^{-5})\ \textit{см}\ \text{при}\ D \leqslant 1000\ \textit{см};$$

$$\delta \geqslant 0{,}15\,(1 + D \cdot 10^{-2})\ \textit{см}\ \text{при}\ D > 1000\ \textit{см}.$$

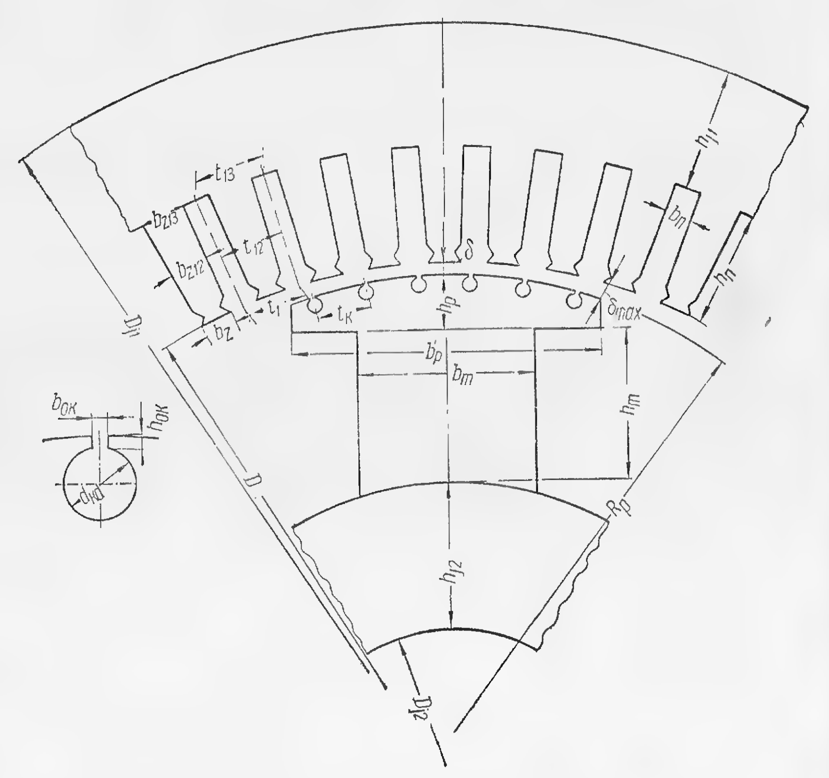



Рис. 268. К расчету магнитной цепи явнополюсной синхронной машины.

## 12-18. ПОЛЮСНЫЕ НАКОНЕЧНИКИ РОТОРА

1. Ширина полюсного наконечника

$$b_p = \alpha\tau,$$

где $\alpha = \frac{b_p}{\tau}$ — коэффициент полюсной дуги; выбирается из условий формы поля и из условий допустимого рассеяния полюсов ($0{,}68 < \alpha < 0{,}72$).

2. Ширина нажимной плиты (щеки) полюсного наконечника (рис. 249)

$$b' \approx b_p.$$



3. Полная длина полюсного наконечника, равная длине полюсного сердечника, обычно равна полной длине статора

$$l_p = l_m = l.$$

Длина шихтованной части полюсного наконечника

$$l'_p = l_p - 2\Delta',$$

где $\Delta' = 1{,}5 \div 3$ *см* — толщина нажимной плиты полюса.

Иногда для уменьшения индукции в полюсах берут

$$l_p = l + 2\Delta'.$$

4. Расчетная длина полюсного наконечника

$$l_{pi} = l_p - \frac{1}{2} n_R b_R,$$

где $n_R$ и $b_R$ — число и ширина радиальных каналов в роторе. При отсутствии каналов

$$l_{pi} = l_p.$$

5. Радиус очертания полюсного наконечника выбирается по способу, рассмотренному в § 3-2.

6. Высота полюсного наконечника

$$h_p \approx (0{,}1 \div 0{,}12)\,\tau \ \text{или}\ h_p = 0{,}3\,(b_p - b_m)$$

уточняется по эскизу полюса и далее при механическом расчете. Если есть демпферная обмотка, $h_p$ приходится увеличивать на величину диаметра стержня клетки.

Полюсные наконечники обычно составляют одно целое с сердечником (рис. 252) и собираются из штампованной листовой стали. Иногда наконечники изготовляются отдельно (в мелких машинах). В крупных машинах целесообразно делать массивные полюса вместе с наконечниками, при этом не нужно устраивать специальную демпферную обмотку.

## 12-19. УСПОКОИТЕЛЬНАЯ ОБМОТКА

Назначение успокоительной обмотки или массивных полюсов в генераторах: *а*) для успокоения малых качаний, б) глушения обратно синхронного поля при несимметричных нагрузках, в) повышения динамической устойчивости, г) уменьшение динамических перенапряжений в обмотке ротора; в двигателях: пуск в ход и успокоение качаний.

Точный расчет успокоительной обмотки необходим, когда к ней предъявляются определенные требования (пуск, несимметричная нагрузка и т. п.). Если таких условий не поставлено, тогда успокоительная обмотка подбирается приближенно.

1. Суммарное сечение стержней на полюс

$$\Sigma q_c = n_c q_c \approx k\,\frac{A\tau}{s},$$

где $s$ — плотность тока статора; $k = 0{,}15$—$0{,}3$ (большие значения для двигателей при высоких входных моментах; меньшие — для генераторов).

2. Шаг пазов демпферной клетки $t_к$ для генераторов выбираем близким к шагу $t_1$ статора для уменьшения добавочных потерь в клетке. При этом для уменьшения высших зубцовых гармонических э. д. с. статора согласно [48] величина шага

$$t_к = \frac{q}{q \pm a} t_1,$$

где $a$ — минимальное целое или дробное число, делающее $q \pm a$ целым.

Для дробных обмоток статора при $N = bd + c > 9$ следует выбирать $t_к = t_1$. По [64] шаг демпферной клетки рекомендуется выбирать в следующих пределах:

$$0{,}8t_1 \leqslant t_к \leqslant 0{,}9t_1 \text{ при } d < 4 \text{ и } 1{,}1t_1 \leqslant t_к \leqslant 1{,}2t_1 \text{ при } d > 4.$$

Следует избегать шага демпферной клетки, удовлетворяющего уравнению

$$\frac{2\tau}{t_к} = 6q \pm 1, \text{ или } t_к = t_1 \frac{6q}{6q \pm 1}.$$

В двигателях для устранения «прилипания»

$$t_к \neq t_1;\ t_к \geqslant 0{,}8t_1;\ (n_c - 1)\left(1 - \frac{t_к}{t_1}\right) > 0{,}75.$$

Стержни на полюсе обычно распределяются равномерно по полюсной дуге. Для уменьшения потерь в успокоительной обмотке от пульсаций потока иногда рекомендуется сдвигать осевые линии успокоительной обмотки на полюсах по отношению к осевым линиям полюсов на $\frac{1}{4}t_1$.

3. Число стержней на полюс и их сечение

$$n_c \approx \frac{b_p}{t_к} \text{ — целое число;}$$

$$q_c = \frac{\Sigma q_c}{n_c} = \frac{\pi}{4} d_c^2.$$

Как правило, в синхронных машинах применяются для успокоительной обмотки стержни круглого сечения.

Нормальные диаметры стержней: 8; 9,5; 11; 12,5; 14; 16; 19; 22; 25 *мм*.

Материалы для стержней и их характеристики:

| Материал | Относительное сопротивление | Предел упругости после пайки (в *кг/мм²*) |
|---|---|---|
| Медь . . . . . . . . | 1,0 | 20 |
| Латунь твердая . . . | 4,0 | 52,5 |
| Бронза фосфористая | 6,5 | — |



Предпочтительно применять медные и латунные стержни. Нормальное открытие пазов: ширина — 3 *мм*, высота — 3 *мм*. В тех случаях, когда нужны большие вращающие моменты, высота открытия может быть выбрана равной 1,6 *мм*.

Если не требуются значительные пусковые моменты, применяют закрытые пазы, что несколько уменьшает потери в железе при холостом ходе.

4. Поперечное сечение короткозамыкающего кольца должно составлять 40—50% от $\Sigma q_c$. Изготовляются они из меди и (реже) латуни. Расчет пусковых обмоток и пусковых характеристик приведен в § 12-25. Применение массивных полюсов устраняет необходимость устройства демпферной обмотки и может быть рекомендовано в мощных синхронных генераторах, двигателях и компенсаторах. При этом значительно экономятся цветные материалы и повышается надежность конструкции ротора.

## 12-20. ПОЛЮСНЫЕ СЕРДЕЧНИКИ. ВНУТРЕННИЙ ДИАМЕТР РОТОРА

1. Ширина полюсного сердечника

$$b_m = \frac{\sigma \Phi_{1N}}{l_{pi} B_m \varphi_{Fe\,m}},$$

где $\sigma$ — коэффициент рассеяния (предварительно можно принять $\sigma = 1{,}15 - 1{,}2$; точный расчет $\sigma$ см. в следующем параграфе);

$\varphi_{Fe\,m}$ — коэффициент заполнения листов сердечника (если сердечник шихтованный $\varphi_{Fe\,m} = 0{,}95 - 0{,}97$).

Индукция в сердечнике $B_m$ выбирается в пределах 1,4—1,6 *вб/м²*. Желательно рассчитать несколько вариантов, например, $B_m = 1{,}4$ *вб/м²* и $B_m = 1{,}5$ *вб/м²*.

2. Ориентировочное определение высоты полюсного сердечника.

Из векторной диаграммы (рис. 270) следует, что м. д. с. возбуждения при нагрузке на полюс

$$F_{fN} = i_{fN} w_f = H_{Cu\,f} b_{Cu\,f} s_f \approx F_{1N} \sqrt{\frac{1}{x_{ad}^2} + 1 + \frac{2}{x_{ad}} \sin \varphi_N},$$

где $F_{1N}$ — м. д. с. статора на полюс. Отсюда общая высота меди катушки $H_{Cu\,f}$ для однорядной обмотки

$$H_{Cu\,f} = \frac{F_{fN}}{s_f b_{Cu\,f}};\ b_{Cu\,f} \approx (0{,}7 \div 1) \frac{b_p - b_m}{2}.$$

Плотность тока возбуждения $s_f$ см. табл. 81.

Высота сердечника с учетом изоляции для однорядных катушек

$$h_m \approx 1{,}15\ H_{Cu\,f} + 5 \text{ см}$$

или ориентировочно

$$h_m = (3 \div 3{,}5) \frac{F_{fN}}{s_f (b_p - b_m)}.$$

По данным [64] $h_m = 10\delta + 8$ *см* (для крупных машин).

Для многорядных катушек и $2p \leqslant 8$

$$h_m \approx (0{,}5 \div 0{,}7)\, b_p \text{ или } h_m \approx (1{,}3 \div 1{,}5)\, H_{Cuf},$$

где

$$H_{Cu\,f} = \frac{F_{fN}}{s_f b_{Cu\,cp}};\; b_{Cu\,cp} \approx 0{,}4\,(b_p - b_m).$$

Необходимо начертить размерный эскиз пары полюсов и уточнить величины $h_m$, $h_p$ (рис. 268).

Окончательная высота определяется после расчета магнитной цепи, укладки обмотки возбуждения и проверки ее на нагрев.

Общая высота полюса

$$h_m = h_m + h_p.$$

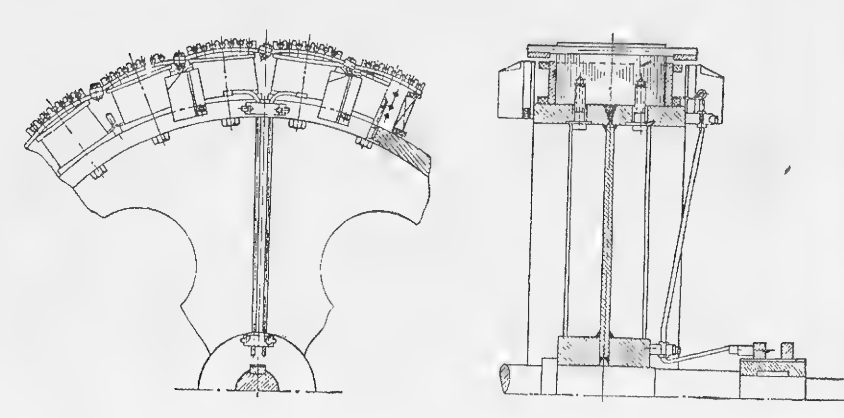


Рис. 269. Ротор тихоходной синхронной машины.

3. Сечение нажимной плиты (щеки)

$$Q'_m = b'\Delta',$$

где $b'$ и $\Delta'$ по § 12-18.

4. Длина сердечника

$$l_m \approx l_p;\; l'_m = l_m - n_R b_R.$$

5. Общее сечение полюса и двух плит

$$Q_m = b_m l'_m \varphi_{Fe\,m} + 2Q'_m.$$

6. Индукция в полюсе

$$B_m = \frac{\sigma \Phi_{1N}}{Q_m}.$$

7. Высота ярма (обода) ротора (рис. 268), по условиям насыщения

$$h_j = \frac{\sigma \Phi_{1N}}{2 l_{j2} B_{j2}} \text{ см}.$$

Длина $l_{j2} = l + c'$, где для крупных машин $c' \approx 10-15$ *см*, для средних $c' \approx 4-5$ *см*, для мелких $c' \approx 0$.

Индукция в ярме выбирается (1,1—1,2) *вб/м²*.



Ярмо или обод могут быть шихтованными из сегментов (крупные гидрогенераторы), сварными или литыми вместе со спицами (в средних и тихоходных машинах, рис. 269), шихтованными из целых или составных дисков (рис. 292).

Сечение и высота обода обычно выбираются больше, чем по приведенной формуле, чтобы обеспечить заданный $GL^2$ и механическую прочность. Обычно $h_{об} \approx (1{,}5 \div 2)\, h_{j2}$, поэтому м. д. с. на ярмо ротора пренебрегают. Высота обода крупных гидрогенераторов $h_{об} \approx (1{,}4 \div 1{,}5)\, h_m$ проверяется при расчете ротора на механическую прочность. В массивных роторах, собираемых из целых дисков, обод составляет одно цилиндрическое тело вместе с валом.

8. Внутренний диаметр ротора (предварительно)

$$D_{j2} = D - 2\,(\delta + h'_m + h_{об}).$$

$D_{j2}$ и $l_{j2}$ уточняются после механического расчета и конструирования, когда точно определены $h'_m$ и $h_{j2}$.

## 12-21. ПРОВОДИМОСТЬ ОТ ПОТОКА РАССЕЯНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ И М. Д. С. ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

1. Проводимость от потока рассеяния между полюсами

$$\lambda_{s2} = \lambda_m + \lambda_p,$$

где $\lambda_m$ — проводимость между полюсными сердечниками;

$\lambda_p$ — проводимость между полюсными наконечниками.

По преобразованным формулам [71] получаем:

$$\lambda_m = 4\left(\frac{h_m}{2c_m} + 0{,}41\,\frac{h_m}{l}\right); \quad (11)$$

$$\lambda_p = 4\left(\frac{h_{pm}}{c_p} + 1{,}35\,\frac{h_{pm}}{l}\right); \quad (12)$$

$$h_{pm} = \frac{2}{3}\,h_p + \frac{1}{3}\,h'_p.$$

Обозначения приведены на рис. 97.

По другому методу [102] рассчитывается величина $0{,}4\pi\lambda_{s2}$

$$0{,}4\pi\lambda_{s2} = 4\,(\lambda_{mb} + \lambda_{ml} + \lambda_{pl}),$$

где $\lambda_{mb}$ — проводимость лобовых частей;

$\lambda_{ml}$ — проводимость сердечников между полюсами;

$\lambda_{pl}$ — проводимость рассеяния между полюсными наконечниками.

Коэффициент 4 входит потому, что величины в скобках рассчитаны на одно междуполюсное пространство. Так как поток рассеяния имеет место с двух сторон полюса и длина трубок на один полюс в 2 раза меньше, то проводимость получается в 4 раза больше.

$$\lambda_{mb} = 0{,}37\,\frac{b_m}{l_m};\; \lambda_{ml} = 0{,}55\,\frac{h_m}{c_m};$$

$$\lambda_{pl} = 1{,}4\left(\frac{d_t}{c_p} - 0{,}25\right) + 0{,}55\left(\frac{a}{c_p} + 0{,}2\right) - 0{,}4\left(\frac{a}{c_p} - 0{,}5\right)^2;$$

$$a = \frac{1}{2}\,(b_p - b_m);\; c_p = \tau - b_p - \frac{2\pi d_t}{2p};\; d_t = h_p + \delta - \frac{b_t^2}{4D}.$$

При $\frac{d_l}{c_p} < 0{,}25$ первым членом в формуле для $\lambda_{pl}$ пренебрегают.

Коэффициент рассеяния полюсов при холостом ходе

$$\sigma = 1 + \frac{\mu_0 (F_\delta + F_z + F_j) \lambda_{s2} l_i}{\Phi_N} = 1 + \frac{0{,}4\pi\lambda_{s2} l_i (F_\delta + F_z + F_j)}{\Phi_N \cdot 10^8}.$$

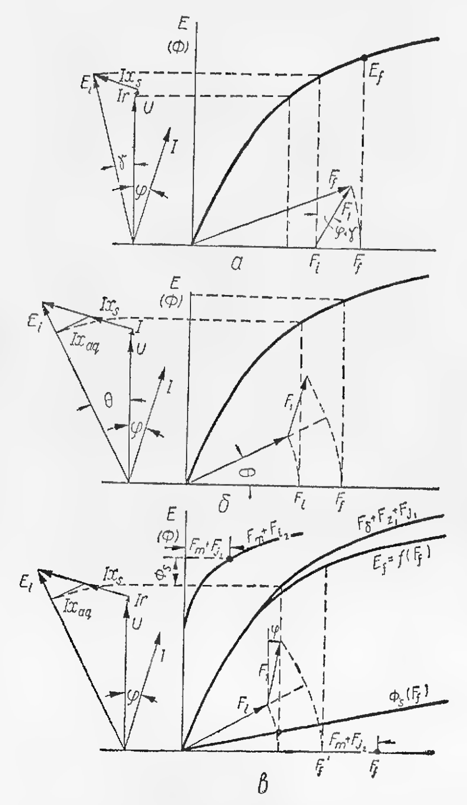


Рис. 270. Определение м. д. с. возбуждения на один полюс по диаграммам Потье (*а*) и Блонделя с учетом (*в*) и без учета (*б*) рассеяния полюсов.

При нагрузке

$$\sigma = 1 + \frac{0{,}4\pi\lambda_{s2} l_i F_{fN}}{\Phi_N \cdot 10^8},$$

где $F_{fN}$ определяется по рис. 270.

2. Зависимость э. д. с. (или полезного потока) холостого хода от м. д. с. (или тока) возбуждения представляет собой характеристику намагничивания. Нормальная характеристика приведена на рис. 14, а метод ее расчета — в гл. 3 и в примерах.

Для определения м. д. с. возбуждения при номинальной нагрузке необходимо определить реактивности якоря (§ 12-24):

а) продольную реактивность реакции якоря

$$x_{ad} = k_d x_m = k_d \frac{F_{1N}}{F_{\delta N}};$$

б) реактивность рассеяния $x_s$;

в) продольную синхронную реактивность

$$x_d = x_{ad} + x_s;$$

г) поперечную синхронную реактивность

$$x_q = x_{aq} + x_s;$$

$$x_{aq} = k_q \frac{F_{1N}}{F_{\delta N}}.$$

$k_d$ и $k_q$ находятся по рис. 267.

Построение диаграммы Потье или диаграммы Блонделя (рис. 270) с учетом или без учета рассеяния полюсов и определение по диаграмме и характеристике намагничивания полной м. д. с. полюсов при номинальной нагрузке приведен в примерах расчетов.



## 12-22. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Многовитковые (многорядные) катушки должны иметь скошенную форму (рис. 252). Однорядные катушки из ленточной меди сечением от 30 до 1000 *мм*² наматываются на ребро. Минимальная толщина шины при данной ее ширине $b$ [71]

$$a = \left[0{,}6 + \frac{b\,(мм)}{100}\right] мм.$$

Обычно

$$\frac{b}{a} \approx 10 \div 15.$$

Для улучшения охлаждения при сечении $q_f > 300$ *мм*² применяется полосовая медь фигурного профиля (рис. 252, *а*), изготовляемая по специальному заказу. Плотность тока в однорядных обмотках больше, чем в многорядных, кроме того, однорядные обмотки более надежны.

Сечение меди зависит от выбранного напряжения возбуждения. Чтобы в машинах малых мощностей можно было применять более выгодные однорядные катушки, приходится иногда применять низкие напряжения возбуждения (25, 35, 50, 65, 80 и 100 *в*). Для машин средних мощностей напряжение может быть 115 и 230 *в*, а для крупных машин приходится брать 300, 400, 500 *в* и выше, так как при слишком большом сечении полосовой меди затрудняется намотка.

1. Выбор сечения меди обмотки возбуждения $q_f$. Из уравнения

$$U_f = i_f r_f = \frac{2pF_{fN} l_{wf} \rho_{75}}{q_f}$$

сечение меди

$$q_f = \rho_{75} \frac{2p l_{wf} F_{fN}}{U_f}.$$

Выбираем провод по стандарту (приложение III). Сечение провода в многорядных обмотках нежелательно больше 60 *мм*². Отношение сторон следует принимать $\frac{b}{a} = 1{,}5 \div 2$. Если при $U_f = 115$ *в* получается $q_f \leqslant 2{,}5$ *мм*², необходимо применять круглый провод, при этом теплоотдача будет много ниже, чем при однорядной меди (гл. 6).

2. Средняя длина витка: для однорядных обмоток

$$l_{wf} \approx 2l + \pi (b_m + b_{\mathrm{Cu}\,f} + 0{,}8),$$

более точно в приложении V;

для многорядных обмоток

$$l_{wf} \approx 2(l + b_m) + \pi b_{об},$$

где $b_{об}$ — средняя ширина обмотки.

3. Ширина обмотки

$$b_{об} = \frac{b_p - b_m}{2}.$$

Более точно $b_{об}$ определяется по эскизу (рис. 252). Ширина меди в однорядных обмотках $b_{\mathrm{Cu}\,f} \approx b_{об}$.

4. Выбор плотности тока возбуждения $s_f$ из условий допустимого перегрева.

Удельный тепловой поток с поверхности катушки (гл. 6), учитывая теплоотдачу только с внешней поверхности,

$$w_{af} = s_f^2 \rho b_{Cu\,f} = \alpha_f \theta_f',$$

отсюда

$$s_f = \sqrt{\frac{\alpha_f}{\rho b_{Cu\,f}} \theta_f'} \ a/см^2.$$

Здесь $\theta_f'$ — превышение температуры меди над температурой охлаждающего воздуха в машине. Если принять согласно норм $\theta_f$ для однорядных обмоток с изоляцией класса В равным 95° С, то

$$\theta_f' = 95 - \frac{1}{2}(\theta_{a\,гор} - \theta_{a\,хол}) \approx 75° С.$$

Соответственно, для многорядных обмоток с изоляцией класса А

$$\theta_f' = 65 - \frac{1}{2}(\theta_{a\,гор} - \theta_{a\,хол}) \approx 45° С;$$

$\alpha_f$ определяется по рис. 62.

Величину плотности тока $s_f$, полученную по вышеприведенной формуле, следует сравнить с табл. 81.

*Таблица 81*

**Допустимые плотности тока для обмоток возбуждения синхронных явнополюсных машин**

| Тип обмотки | Плотность тока (в $a/см^2$) |
|---|---|
| Однорядная из шинной меди, мощность машин 100—5000 *квт* . . . . . . | 300—400 |
| Однорядная из шинной меди, мощность свыше 10 000 *квт* . . . . . . . . | 250—300 |
| Многорядная из круглой или прямоугольной меди, изоляция ПБД, мощность до 20 *квт* . . . . . . . . . . . | 200—250 |

5. Ток и число витков обмотки возбуждения:

$$i_{fN} = s_{fN} q_f;$$

$$w_f = \frac{F_{fN}}{i_{fN}} \text{ (целое число или целое плюс } 1/2).$$

6. Определяем габариты катушки, выбираем изоляцию меди и прокладки, составляем эскиз полюса. Проверяем размещение катушек в межполюсном пространстве. Точно определяем высоту полюсного сердечника $h_m$ и корректируем $h_m'$.

7. Сопротивление обмотки возбуждения в холодном состоянии

$$r_{f15} = \rho_{15} \frac{2p w_f l_{wf}}{q_f} \ ом.$$



Сопротивление обмотки возбуждения в горячем состоянии при температуре, соответствующей нормам для данного класса изоляции

$$r_{f(\theta)} = r_{f15} \frac{235 + \theta}{235 + 15}.$$

8. Напряжение на кольцах ротора:
номинальное

$$U_{fN} = r_{f(\theta)} i_{fN};$$

при холостом ходе и холодной машине

$$U_{f0} = r_{f15} i_{f0};$$

минимальное и потолочное напряжение возбудителя

$$U_{f\,min} = 0{,}5 U_{f0};$$

$$U_{f\,max} = (1{,}4 \div 2)\, U_{fN}.$$

При особых требованиях к устойчивости потолочное возбуждение увеличивается до $U_{f\,max} = (2 \div 2{,}5)\, U_{fN}$, а иногда и до (4—5) $U_{fN}$.

9. Скорость нарастания напряжения («взлет»)

$$\frac{U_f}{t} = (1 \div 1{,}5)\, U_N \ в/сек.$$

Иногда задается большая скорость.

10. Максимальный ток возбуждения

$$i_{f\,max} = \frac{U_{f\,max} - 5}{r_{f(\theta)}}.$$

11. Мощность возбуждения:
номинальная

$$p_{fN} = U_{fN} i_{fN} + \Delta U i_{fN},$$

где $\Delta U = 2в$ — падение напряжения в контакте щеток;
кратковременная (6 секунд) *

$$p_{f\,max} = U_{f\,max} i_{f\,max}.$$

12. Многорядные обмотки возбуждения проверяются на нагрев с учетом внутреннего перепада температур $\theta_{if}$ по формуле (13). При

$$p_x' = s_f^2 \rho_\theta \frac{h_к}{h_к + b_к}; \ \Sigma\Delta_{if} = n_b(\Delta_i + 0{,}02) \ см,$$

где $n_b$ — число рядов по ширине катушки;
$\Delta_i$ — двухсторонняя толщина изоляции проводника, *см*; обычно $\Delta_i = 0{,}035$ *см*;
0,02 — добавка на неплотность, получаем согласно гл. 6

$$\theta_{if} = \frac{k_1}{12} s_f^2 \rho_\theta b_к \frac{h_к}{h_к + b_к} \frac{n_b(\Delta_i + 0{,}02)}{k_i} \ °С. \qquad (13)$$

* В отдельных случаях требуется обеспечение $p_{f\,max}$ в течение 2 мик.

При $k_1 \approx 1{,}5$; $k_i = 0{,}0015$ *вт/°С · см;* $\rho_\theta = \rho_{75} = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *ом см*, $\Delta_i = 0{,}035$ *см* и $s_f$ в *а/мм²* получим

$$\theta_{if} = 0{,}1 s_f^2 \frac{b_к h_к}{b_к + h_к} n_b \text{ °C}. \qquad (14)$$

Полное превышение температуры обмотки возбуждения

$$\theta_f = \frac{p_{fN}}{S_f \alpha_f k_\beta} + \theta_{if}, \qquad (15)$$

где $S_f$ — поверхность охлаждения обмотки возбуждения;
$\alpha_f$ — по рис. 62;
$k_\beta$ — по рис. 62 или по формуле

$$k_\beta \approx \sqrt[2,5]{\frac{\tau}{l}} = \sqrt[2,5]{\beta}.$$

По [65]

$$\theta_f = \frac{\left(2{,}8 + \frac{1}{\beta}\right) F_{fN} s_f}{76 h_s \left(1{,}6 + \sqrt{v}\right)} + \frac{F_{fN} s_f}{76 h_s} \Delta_i (n_b - 0{,}5), \qquad (16)$$

где $h_s$ — боковой периметр катушки.

Для однорядных катушек вторым слагаемым в (16) можно пренебречь.

## 12-23. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И К. П. Д.

1. Вес меди обмотки статора. Величина, полученная в § 12-15, уточняется здесь путем подстановки значения длины витка обмотки по приложению VI или чертежу секции.

2. Вес изоляции обмотки статора. Уточняем вес корпусной изоляции после окончательного расчета обмотки. Для двухслойной катушечной или стержневой обмотки с непрерывной изоляцией секций (приложение V)

$$G_i = 2\gamma_i Z_1 (h_c + b_c - 2\Delta_i)\, l w_1 \ кг,$$

где $h_c$ и $b_c$ — высота и ширина изолированной секции, *см*;
$\Delta_i$ — односторонняя толщина изоляции, *см*;
$\gamma_i \approx 2 \cdot 10^{-3}$ *кг/см³* — для микалентной изоляции;
$\gamma_i = 2{,}3 \cdot 10^{-3}$ *кг/см³* — для стекломикалентной изоляции.

3. Вес меди обмотки возбуждения

$$G_{Cu\,f} = l_{wf}\, q_f \gamma_{Cu} \ кг.$$

4. Вес успокоительной обмотки

$$G_{kd} = (2 p n_c l_c q_c + 2\pi D_л q_л)\, \gamma \ кг,$$

где $D_л$ — средний диаметр короткозамыкающих колец;
$q_л$ — сечение кольца;
$l_c$, $q_c$ — длина и сечение стержней;
$\gamma$ — удельный вес.



5. Суммарный вес меди

$$\Sigma G_{Cu} = G_{Cu1} + G_{Cu\,f} + G_{kd}.$$

6. Вес меди на 1 *ква*

$$G_{Cu} = \frac{\Sigma G_{Cu}}{P_N}.$$

7. Суммарный вес железа статора (см. § 12-15):

$$G_{Fe} = G_z + G_j.$$

8. Вес железа статора на 1 *ква*

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P_N} \ кг/ква.$$

9. Вес полюсов

$$G_m = (Q_m h_m + Q_p h_{pm})\, \gamma_{Fe},$$

где $Q_p = b_p h_p$ — сечение полюсного наконечника.

10. Вес обода

$$G_{j2} = \pi D'_{j2} h_{j2} l_{j2} \gamma_{Fe},$$

где $D'_{j2}$ — средний диаметр обода.

11. Суммарный вес железа статора, полюсов и обода без учета конструктивных материалов

$$\Sigma G_{Fe} = G_{Fe} + G_m + G_{j2}.$$

12. Полный вес железа на 1 *ква*

$$\Sigma g_{Fe} = \frac{\Sigma G_{Fe}}{P_N} \ кг/ква.$$

13. Производный вес активных материалов

$$g_{пр} = \frac{\Sigma G_{Cu} + \Sigma G_{Fe} \dfrac{m_{Fe\,(ср)}}{m_{Cu\,(ср)}}}{\left(\dfrac{P_N}{n}\right)^{3/4}}.$$

14. Стоимость активных материалов и стоимость изоляции определяется по ценникам.

После расчета необходимо сравнить удельные весовые и стоимостные показатели с показателями близких по конструкции машин.

15. Основные и добавочные потери в меди статора:

$$p_{Cu\,(осн)} = 3 I_w^2 r_{1\,75};$$

$$p_{Cu\,(доб)} = p_{Cu\,(осн)} (k_r - 1),$$

где $k_r$ — коэффициент увеличения сопротивления от вихревых токов; определяется по гл. 5. Обычно $k_r = 1{,}05 - 1{,}2$. Точный расчет $k_r$ см. в примере расчета.

16. Суммарные потери в меди статора

$$p_{Cu1} = p_{Cu\,(осн)} + p_{Cu\,(доб)}.$$

17. Суммарные основные потери в железе (рассчитаны в § 12-15)

$$p_{Fe} = p_z + p_j.$$

18. Суммарные добавочные потери

$$p_{доб} = p_{Cu\,доб} + p_{oR} + p_{z3} + p_{\nu R} + p_{zR} + p_{пл}.$$

Добавочные потери обычно должны находиться в пределах:

| | | |
|---|---|---|
| для машин до | 100 *ква* | $0{,}01\ P_N$ |
| » до | 1000 *ква* | $0{,}005\ P_N$ |
| » свыше | 1000 *ква* | $(0{,}0025—0{,}004)\ P_N$ |

Точный расчет добавочных потерь дан в гл. 5 и в примерах расчета.

19. Потери на возбуждение:

при независимом возбуждении

$$p_f = i_{Nf}^2 r_{fN} + \Delta U i_{fN};$$

при питании от собственного возбудителя

$$p_f = \frac{i_{fN}^2 r_{fN} + \Delta U i_{fN}}{\eta_в},$$

где $\eta_в$ — к. п. д. возбудителя;

$\Delta U = 2\,в$ — падение в контакте щетки — кольца.

20. Механические потери (на трение и вентиляцию) рассчитываются по гл. 5 и в примерах расчетов.

21. Суммарные потери

$$\Sigma p = p_{Cu\,осн} + p_{Fe} + p_f + p_m + p_{доб}.$$

22. Коэффициент полезного действия:

для генераторов

$$\eta_N = 1 - \frac{\Sigma p}{P_N \cos\varphi + \Sigma p};$$

для двигателей

$$\eta_N = 1 - \frac{\Sigma p}{P_{2N} + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_N \cos\varphi}.$$

После расчета нескольких вариантов машины необходимо сопоставить не только расчетные показатели, но и показатели изготовленных близких по конструкции машин. Основные сравниваемые показатели: 1) веса статора и ротора, расход активных и конструктивных материалов на единицу мощности и стоимость материалов; 2) расход изоляции и ее стоимость; 3) потери в машине и к. п. д.; 4) нагрев обмоток и железа; 5) маховые моменты; 6) трудоемкость изготовления отдельных узлов; 7) надёжность конструкции (в частности, механические напряжения наиболее напряженных деталей, критические скорости и пр.).

В отношении экономической оценки отдельных показателей необходимо учесть сказанное в гл. 2.



## 12-24. ПАРАМЕТРЫ СИНХРОННЫХ ЯВНОПОЛЮСНЫХ МАШИН

### Основные параметры якоря

1. Реактивность основной волны поля реакции якоря по продольной оси $x_{ad}$, выраженная в омах, равна отношению амплитуды э. д. с. от поля реакции якоря к амплитуде тока якоря при чисто продольной реакции

$$x_{ad} = \frac{\sqrt{2}\,E_{aN}}{\sqrt{2}\,I_N} = \frac{2\pi f \Phi_{aN} w k_w}{\sqrt{2}\,I_N}\ ом. \quad (17)$$

Поток основной волны продольной реакции якоря равен м. д. с. основной волны, умноженной на магнитную проводимость основной волны с учетом явнополюсности,

$$\Phi_{aN} = \mu_0 \frac{2}{\pi} \tau l_i F_{1N} k_{ad} = \mu_0 \lambda_{a1} l_i \frac{m\sqrt{2}\,I_N}{\pi p} w k_w, \quad (18)$$

где $\lambda_{a1} = \frac{2}{\pi}\frac{\pi}{\delta'}$ — проводимость зазора для основной волны на единицу длины.

Отсюда

$$x_{ad} = 2\pi f \mu_0 l_i \lambda_{a1} k_{ad} \frac{m}{\pi p} (w k_w)^2\ ом. \quad (19)$$

В относительных единицах

$$x_{ad} = \frac{x_{ad}\,(ом)\, I_N \sqrt{2}}{\sqrt{2}\,U_N} = \frac{\mu_0 F_{1N} \lambda_{a1} k_{ad}}{\Phi_N} \quad (20)$$

или, так как

$$\Phi_N = \mu_0 \lambda_{fm1} l_i F_{\delta N},$$

где $\lambda_{fm1} \approx k_1 \frac{2}{\pi}\frac{\tau}{\delta'}$ — проводимость для основной волны поля возбуждения (рис. 13), то

$$x_{ad} = \frac{F_{1N} k_{ad} \lambda_{a1}}{F_{\delta N} k_1 \lambda_{a1}} = k_d \frac{F_{1N}}{F_{\delta N}}, \quad (21)$$

где

$$k_d = \frac{k_{ad}}{k_1}\ (рис.\ 267).$$

2. Реактивность рассеяния якоря по гл. 4

$$x_s = 4\pi f \mu_0 l_i \frac{w^2}{pq} (\lambda_п + \lambda_л + \lambda_\delta)\ ом; \quad (22)$$

в относительных единицах

$$x_s = \frac{x_s \sqrt{2}\, I_N}{\sqrt{2}\, U_N} = \frac{2\pi\mu_0 F_{1N} l_i}{k_w^2 \Phi_N} \left(\frac{\lambda_п + \lambda_л + \lambda_\delta}{mq}\right) \quad (23)$$

или

$$x_s = x_{ad} \sigma_s,$$

где

$$\sigma_s = \frac{x_s}{x_{ad}} = \frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{a1} k_{ad} k_w^2};$$

$$\lambda_{s1} = \frac{2\pi}{mq} (\lambda_п + \lambda_л + \lambda_\delta).$$

Проводимость рассеяния паза $\lambda_п$, лобовых частей $\lambda_л$ и дифференциальная $\lambda_\delta$ определены в гл. 4.

3. Продольная синхронная реактивность

$$x_d = x_{ad} + x_s. \quad (24)$$

4. Поперечная синхронная реактивность

$$x_q = x_{aq} + x_s. \qquad (25)$$

5. Активное сопротивление якоря

$$r_1 = \rho_{75} \frac{l_w w_1}{q_ф} k_r \ ом, \qquad (26)$$

$$r_1 = \frac{r_1\,(ом)\sqrt{2} I_N}{\sqrt{2}\,U_N} = \frac{\rho_{75} w l_w \sqrt{2}\, I_N}{q_ф 2\pi f \Phi_N w k_{w_1}} = \frac{\rho_{75}\,(l + l_л)\, F_{1N}}{f \Phi_N k_{w1} Q_{Cu}}, \qquad (27)$$

где $l + l_1 = 0{,}5\, l_w$ — длина полувитка;

$Q_{Cu}$ — общее сечение меди статора на полюс

$$Q_{Cu} = \frac{mw}{p} q_ф.$$

6. Основные параметры обмотки возбуждения

Статическая реактивность * обмотки возбуждения по основной волне потока в зазоре

$$x_{fm1} = 2\pi f \mu_0 w l \lambda_{fm1}\, 2p \ ом,$$

в относительных единицах (28)

$$x_{fm1} = \frac{x'_{fm}\,(ом)\,\sqrt{2}\, I_N}{\sqrt{2}\, U_N}, \qquad (29)$$

где $x'_{fm}$ — величина $x_{fm1}$, приведенная к обмотке статора. Приведение делается различными способами. Наиболее правильным будет такое, при котором приведенные реактивности взаимоиндукции будут равны.

Первое условие приведения — равенство мощностей

$$i_f^2 x_f = \frac{1}{2} (\sqrt{2} I_f')^2\, x_f'\, m; \quad i_f^2 r_f = \frac{1}{2} (\sqrt{2} I_f)^2\, r_f. \qquad (30)$$

Здесь $\sqrt{2} I_f'$ — амплитуда эквивалентного $m$ фазного тока.

Второе условие приведения — равенство основных волн потоков в зазоре

$$i_f w_f \lambda_{fm_1} = \frac{m}{\pi} \frac{\sqrt{2} I_f'}{p} w_1 k_{w1} \lambda_{a1} k_{d1}. \qquad (31)$$

Из этих условий при $\frac{\lambda_{a1} k_{d1}}{\lambda_{fm1}} = k_d$ получаем

$$x'_{fm} = k' x_{fm} \ ом;$$
$$r'_f = k' r_f \ ом, \qquad (32)$$

где

$$k' = \frac{2}{m} \left(\frac{w_1 k_w k_d}{\pi p w_f}\right)^2. \qquad (33)$$

Подставляя (32) в (29), получим

$$x_{fm1} = \frac{\frac{4}{\pi} \mu_0 \lambda_{fm} l F_{1N} k_d^2}{\Phi_N} \qquad (34)$$

или, так как

$$\Phi_N = \mu_0 F_{\delta N} \lambda_{fm_1} l,$$

то

$$x_{fm1} = \frac{4}{\pi} k_d x_{ad}. \qquad (35)$$

* Статической эту реактивность можно назвать потому, что она не учитывает вихревых токов и является произведением $\omega$ на статическую индуктивность $L_{fm}$.



Иногда приведение делается из условий равенства прямоугольных эквивалентных м. д. с., при этом

$$x_{fm_1} = \frac{\pi}{4 k_d} x_{ad} = \frac{\pi}{4} \frac{F_{1N}}{F_{\delta N}} \qquad (36)$$

получается в $\frac{4}{\pi k_d}$ раз меньше.

Так как в нормальных машинах $\frac{4}{\pi} k_d \approx 1$, то принимают

$$x_{fm_1} = x_{ad}. \qquad (37)$$

7. Реактивность рассеяния обмотки возбуждения в относительных единицах получится аналогично (34) в виде

$$x_{fs} = \frac{\frac{4}{\pi} \mu_0 \lambda_{fs} l_i k_d^2 F_{1N}}{\Phi_N} = \frac{4}{\pi} k_d x_{ad} \sigma_{fs}, \qquad (38)$$

где

$$\sigma_{fs} = \frac{x_{fs}}{x_{fm_1}} = \frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{fm_1}} = \frac{\mu_0 F_{\delta N} l_i \lambda_{fs}}{\mu_0 F_{\delta N} l_i \lambda_{fm_1}} = \frac{0{,}4\,\pi \lambda_{fs} l_i F_{\delta N}}{\Phi_N 10^8};$$

$\lambda_{fs}$ — магнитная проводимость потокосцепления рассеяния на полюс на единицу длины. Приближенно $\lambda_{fs}$ определяется по формуле (обозначения по рис. 97):

$$0{,}4\,\pi\lambda_{fs} = 0{,}4\,\pi \left[ 4 \left(\frac{h_m}{3c_m} + \frac{h_{pm}}{c_p} + \frac{2h_m + 0{,}5 b_m}{4 l_i}\right) + \sigma_{\delta_2} \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{\delta'} \right]. \qquad (39)$$

Более точная формула [102]

$$0{,}4\,\pi\lambda_{fs} = \left(\frac{\lambda_{ml}}{1{,}53} + \frac{\lambda_{mb}}{2{,}65} + \lambda_{pl}\right) 4 + 0{,}8\,\sigma_{\delta_2} \frac{\tau}{\delta'}, \qquad (40)$$

где $\lambda_{ml}$, $\lambda_{mb}$ и $\lambda_{pl}$ см. § 12-21; $\sigma_{\delta_2}$ определяется по § 4-5 (стор. 108).

Полная реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = x_{ad} + x_{fs}. \qquad (41)$$

Как видно, относительные реактивности взаимоиндукции (или рассеяния) магнитносвязанных обмоток равны отношению потока взаимоиндукции (или рассеяния), создаваемого единичной м. д. с., действующей в рассматриваемой обмотке, к номинальному потоку.

8. Единица тока возбуждения. За единицу тока возбуждения $i_{f_1}$ принят такой ток, который создает поток и э. д. с. в якоре, равные потоку и э. д. с. реакции якоря в продольной оси при номинальном токе якоря. Этот ток определяется из равенства (31) подстановкой $\sqrt{2} I_f' = \sqrt{2} I_N$.

Вторая единица тока $i_{f\delta}$ определится как ток, который создает поток и э. д. с. в якоре, равные их номинальным значениям, при отсутствии насыщения. Таким образом, между этими единицами будет соотношение

$$\frac{i_{f\,(1)}}{i_{f\delta}} = x_{ad}. \qquad (42)$$

9. Активное сопротивление обмотки возбуждения по (32) и (33)

$$r_f = \frac{r_f' I_N}{U_N} = \rho_{75} \frac{2}{\pi^2} k_d^2 \frac{l_{wf}}{w_f q_f} \frac{F_N}{\Phi_N f}; \qquad (43)$$

$$r_{fk} = r_f (k + 1), \qquad (44)$$

где $l_{wf}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, *см*;

$q_f$ — сечение меди, *см²*;

$k$ — отношение дополнительного сопротивления, включенного последовательно с обмоткой возбуждения к сопротивлению обмотки возбуждения. С достаточной точностью относительные величины сопротивления обмоток равны отношению падения напряжения от тока, равного единичной м. д. с., к номинальному напряжению на один виток, другими словами, относительные активные сопротивления равны отношению потерь в данной обмотке при единичном токе к единичной мощности машины, то есть

$$r_f = \frac{i_{f(1)}^2 r_f}{P_N}, \tag{45}$$

где $i_{f(1)}$ — определяется по (42).

### Параметры демпферной обмотки

Для определения параметров демпферной обмотки в долях единицы можно пользоваться двумя способами. По первому способу симметричная по отношению к осям демпферная обмотка из $n_c$ стержней на полюс может быть приведена к эквивалентной обмотке из двух стержней в продольной и двух стержней в поперечной оси общим сечением каждой по 0,5 $n_c q_c$, где $q_c$ — сечение одного стержня. В этом случае определение реактивностей и активных сопротивлений в долях единицы аналогично рассмотренному выше для обмотки возбуждения. По второму способу демпферная обмотка рассматривается как беличья клетка асинхронного двигателя.

10. Продольная реактивность взаимоиндукции демпферной обмотки

$$x_{md} = \frac{\mu_0 l_i \lambda_{md} F_{1N}}{\Phi_N} = x_{ad}. \tag{46}$$

11. Продольная реактивность рассеяния

$$x_{kd} = \frac{\mu_0 l_i \lambda_{kd} F_{1N}}{\Phi_N}. \tag{47}$$

При вычислении проводимости рассеяния $\lambda_{kd}$ надо иметь в виду, что она должна быть определена на один полюс. Проводимость рассеяния на полюс равна проводимости на один паз, поделенной на число пазов на полюс. Проводимость рассеяния демпферной обмотки на один паз может быть рассчитана так же, как это было сделано для обмотки статора в гл. 4. Она складывается из пазовой проводимости $\lambda_{\text{п}\,kd}$, лобовой $\lambda_{\text{л}\,kd}$ и дифференциальной $\lambda_{\delta\,kd}$.

Для круглых стержней

$$\lambda_{\text{п}\,kd} = 0{,}623 + \frac{h_0}{b_0}. \tag{48}$$

Для прямоугольных стержней $\lambda_{\text{п}kd}$ — по § 4-2.

При отсутствии пазового открытия (шлица) проводимость рассчитывается по способу, рассмотренному в § 11-16.

Проводимость рассеяния лобовой части

$$\lambda_{\text{л}\,kd} = 0{,}06 \frac{\tau}{l_i} n_c. \tag{49}$$

Дифференциальная проводимость по гл. 4

$$\lambda_{\delta\,kd} = \left(\frac{n_c}{\pi}\right)^2 \frac{t_\text{к}}{\delta'} \sigma_z \approx \frac{t_\text{к}}{10\delta'}. \tag{50}$$

Полная проводимость на один полюс

$$\lambda_{kd} = \frac{2\pi}{n_c} (\lambda_{\text{п}\,kd} + \lambda_{\text{л}\,kd} + \lambda_{\delta\,kd}). \tag{51}$$



Относительная продольная реактивность рассеяния демпферной обмотки

$$x_{kd} = \frac{\mu_0 \lambda_{kd} l_i F_{1N}}{\Phi_N} = x_{ad} \frac{\lambda_{kd}}{k_{d1} \lambda_{a1}} = x_{ad} \sigma_{kd}, \tag{52}$$

где $\sigma_{kd} = \frac{\lambda_{kd}}{k_{d1}\lambda_{a1}}$; $\lambda_{a1}$ определяется по (18).

Полная реактивность

$$x_{1d} = x_{kd} + x_{md} = x_{kd} + x_{ad}. \tag{53}$$

Реактивность машины с массивными полюсами (без демпферной обмотки по гл. 11

$$x_{kd} = \frac{k_{xd} k_\text{л}}{100 B_{\delta N} \tau} \left(\frac{A_N k_{w} \rho \tau s}{\sqrt{2}\, f I_{kd}}\right)^{0,5}, \tag{54}$$

где $B_{\delta N}$ — номинальная индукция в зазоре, *вб/см²*;

$\tau$ — полюсное деление, *см*;

$\rho$ — удельное сопротивление стали полюсов;

$s$ — скольжение;

$f$ — частота;

$I_{kd}$ — ток на поверхности полюсов в долях единицы;

$$k_{xd} \approx 1{,}4\text{—}2;\; k_\text{л} = 1 + \frac{2}{\pi}\frac{\tau}{l}.$$

При коротких замыканиях надо полагать $s = 1$; $I_{kd} = 1$. При расчете пусковых характеристик скольжение $s$ переменно; $I_{kd} \approx 0{,}9 I_{1\text{п}}$, $I_{1\text{п}}$ — ожидаемая кратность пускового тока.

12. Поперечная реактивность клетки может быть рассчитана так же, как и продольная. Необходимо различать два случая: а) обмотка имеет кольца или междуполюсные соединения; б) имеются только короткозамыкающие сегменты, а междуполюсных соединений не имеется.

В первом случае $x_{kq} < x_{kd}$. Принимают $x_{kq} = 0{,}75\, x_{kd}$.

Во втором случае $x_{kq} > x_{kd}$. Принимают $x_{kq} \approx 2x_{kd}$. Полная реактивность

$$x_{1q} = x_{kq} + x_{aq}. \tag{55}$$

Реактивность $x_{kq}$ машины с массивными полюсами без демпферной обмотки

$$x_{kq} = \frac{k_{xq}}{k_{xd}} x_{kd}, \tag{56}$$

где $k_{xq} \approx 2k_{xd}$ при отсутствии междуполюсных соединений и $k_{xq} \approx k_{xd}$ при наличии междуполюсных соединений.

13. Активные сопротивления демпферных обмоток в продольной оси. Активное сопротивление одного стержня

$$r_c = \frac{\rho l_c}{q_c}\ \text{ом}. \tag{57}$$

Активное сопротивление лобового соединения, приведенного к току стержня. По (107) гл. 11

$$r_\text{л} = 2\left(\frac{n_c}{\pi}\right)^2 \rho_\text{л} \frac{\pi D_\text{л}}{q_\text{л} 2 p n_c} = \frac{\rho_\text{л} l_\text{л} n_c}{q_\text{л}}, \tag{58}$$

где $l_\text{л} = \frac{D_\text{л}}{\pi p}$; $D_\text{л} \approx D$.

Для явнополюсной машины

$$l_\text{л} = \frac{0{,}2D}{p} \tag{59}$$

Приведение обмотки из $n_c$ стержней на полюс к эквивалентной одновитковой обмотке сечением $0{,}5 n_c q_c$ и длиной витка $2(l_c + l_л)$ дает

$$r_{kd(1)} = 8\left(\frac{\rho_c l_c}{q_c n_c} + \frac{\rho_л l_л}{q_л}\right) \text{ ом}. \tag{60}$$

Для получения $r_{kd}$ в относительных единицах, согласно сказанному выше, надо умножить эту величину на единичную (прямоугольную) м. д. с. и разделить на единичную э. д. с. на виток, то есть умножить на $\frac{\pi/4\, F_{1N}}{2\pi f \Phi_N}$, отсюда

$$r_{kd} = \left(\frac{\rho_c l_c}{q_c n_c} + \frac{\rho_л l_л}{q_л}\right)\frac{F_{1N}}{f\Phi_N}, \tag{61}$$

где

$$l_c = l + l_в;$$

длина вылета $l_в \approx 0{,}07\tau$ берется конструктивно;

$\rho_c$ и $\rho_л$ — удельные сопротивления материала стержней и колец, *ом·см*.

Выражение, аналогичное (61), для $r_{kq}$ можно получить по методу, рассмотренному в § 11-15.

Согласно [64] величина $r_{kd}$ принимается на 34% выше определенной по формуле (61). Опыт показывает, что величины $r_{kd}$ и $r_{kq}$ получаются иногда в 2—3 раза больше расчетных вследствие дополнительных потерь в железе полюсов и за счет вытеснения тока, в особенности при частотах 50 и 100 *гц*.

Активное сопротивление в продольной оси в машине с массивными полюсами

$$r_{kd} = \frac{k_{rd}}{k_{xd}} x_{kd}, \tag{62}$$

где

$$\frac{k_{rd}}{k_{xd}} \approx 1{,}5 \div 1{,}75.$$

14. Активное сопротивление демпферной обмотки в поперечной оси в случае, если обмотка имеет короткозамыкающие кольца или междуполюсные соединения

$$r_{kq} = \left(\frac{\rho_c l_c}{q_c n_c} + \frac{2\rho_л l_л}{q_л}\right)\frac{F_{1N}}{f\Phi_N}; \tag{63}$$

в случае, если обмотка имеет короткозамыкающие сегменты и не имеет междуполюсных соединений

$$r_{kq} \approx 3\left(\frac{\rho_c l_c}{q_c n_c} + \frac{0{,}5\rho_л l_л}{q_л}\right)\frac{F_{1N}}{f\Phi_N}. \tag{64}$$

Материалы стержней и колец, их удельные сопротивления и выбираемые сечения $q_c$ и $q_л$ даны в § 12-19.

Активное сопротивление $r_{kq}$ в поперечной оси в машине с массивными полюсами без демпферной обмотки

$$r_{kq} = \frac{k_{rq}}{k_{rd}} r_{kd}. \tag{65}$$

При отсутствии междуполюсных соединений

$$\frac{k_{rq}}{k_{rd}} \approx 2;$$

при наличии соединений

$$\frac{k_{rq}}{k_{rd}} \approx 1.$$



## Параметры нулевого следования фаз

При протекании по трехфазной обмотке токов нулевого следования фаз поле основной волны в зазоре отсутствует. Вместе с тем, исчезают и поля гармонических 5, 7, 11 и т. д.

В воздушном зазоре создаются поля третьей и кратных трем гармонических. Реактивное сопротивление $x_0$ будет определяться рассеянием в пазах, лобовых частях и потоками в зазоре от гармонических кратных трем.

Рассеяние в пазах и лобовых частях будет отличаться от рассеяния при токах прямого следования. Проводимость пазового рассеяния на 1 паз [2]

$$\lambda_{по} = \frac{1}{b_п}\left[(3y-2)h_3 + (9y-5)\frac{h_1}{12} - (9y-8)\frac{h_2'}{12}\right], \tag{66}$$

где для открытых пазов $h_3 = h_{кл} + \Delta$ — высота клина плюс толщина пазовой изоляции; для полузакрытых пазов (рис. 22)

$$h_3 = b_п\left(\frac{h_2'}{b_2} + \frac{h_0}{b_0}\right);$$

$h_2'$ — толщина изоляции между медью верхнего и нижнего слоя;

$y$ — относительный шаг обмотки.

Проводимость лобового рассеяния для корзиночной двухслойной обмотки

$$\lambda_{ло} \approx 0{,}2\lambda_л, \tag{67}$$

где

$$\lambda_л \text{ по гл. 4}.$$

Для катушечных обмоток

$$\lambda_{ло} \approx \lambda_л.$$

15. Реактивность дифференциального рассеяния определяется как сумма гармонических в зазоре, кратным трем плюс зубцовое рассеяние [2]

$$x_{\delta 0} = \frac{4x_{ad}k_0}{k_d k_w^2}\left(y - \frac{2}{3}\right)\left[\left(\frac{2p}{Z}\right)^2 + \frac{1}{27} + \frac{7}{18}\left(y - \frac{2}{3}\right) - \left(y - \frac{2}{3}\right)^2\right], \tag{68}$$

где $k_0 \approx 0{,}5$ — коэффициент уменьшения, обусловленный реакцией вихревых токов в роторе.

16. Реактивность нулевого следования

$$x_0 = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_{1N}}{k_w^2 \Phi_N}\left(\frac{\lambda_{по} + \lambda_{ло}}{mq}\right) + x_{\delta 0}. \tag{69}$$

17. Активное сопротивление

$$r_0 \approx r_1.$$

## Производные реактивности

18. Переходная реактивность в продольной оси

$$x_d' = x_s + \frac{x_{ad}x_{fs}}{x_{ad} + x_{fs}}. \tag{70}$$

19. Сверхпереходная реактивность

$$x_d'' = x_s + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{kd}}\right)^{-1}; \tag{71}$$

$$x_q'' = x_s + \frac{x_{aq}\, x_{kq}}{x_{aq} + x_{kq}}. \tag{72}$$

20. Реактивность обратного следования фаз

$$x_2 \approx \frac{x''_d + x''_q}{2} \tag{73}$$

или

$$x_2 = \sqrt{x''_d x''_q}.$$

21. Активное сопротивление обратного следования приближенно находится по (54) и (62) при $s = 2$.

### Постоянные времени

Постоянные времени в электрических радианах равны отношению реактивности обмотки к ее активному сопротивлению. Для получения постоянной времени в секундах надо величину в электрических радианах разделить на $\omega = 2\pi f$.

22. Постоянные времени обмотки возбуждения при разомкнутом статоре и разомкнутой демпферной обмотке

$$T_f = \frac{x_f}{r_f} \approx T_{d0}. \tag{74}$$

Действительное значение $T_{d0}$, получаемое опытным путем, отличается от $T_f$ вследствие влияния токов в роторе и токов в демпферной обмотке.

23. Постоянная времени переходных токов

$$T'_d = T_f \frac{x'_d}{x_d}. \tag{75}$$

24. Постоянная времени сверхпереходных токов

$$T''_d = T'_{1d} \frac{x''_d}{x'_d}; \quad T'_{1d} = \frac{x'_{1d}}{r_{kd}};$$

$$x'_{1d} = x_{kd} + \frac{x_{ad}\, x_{fs}}{x_{ad} + x_{fs}}. \tag{76}$$

25. Постоянная времени асимметричного тока в статоре

$$T_a = \frac{2x''_d\, x''_q}{(x''_d + x''_q)\, r_1} \approx \frac{x_2}{r_1}. \tag{77}$$

26. Первый пик тока внезапного короткого замыкания

$$I_{max} = 1{,}8\, \frac{U}{x''_d}, \text{ или } I_{max} = 1{,}8\, \frac{U}{x''_d} \sqrt{2} I_N\, a. \tag{78}$$

## 12-25. МЕТОД РАСЧЕТА ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И КОМПЕНСАТОРОВ

### Общие уравнения

При пуске синхронного двигателя или компенсатора, имеющего в продольной оси две обмотки (обмотку возбуждения и пусковую обмотку) и в поперечной оси одну пусковую обмотку, в обмотках ротора возникают пульсирующие токи и потокосцепления частоты скольжения. (Случай пуска при замкнутом на разрядное сопротивление роторе). Разлагая пульсирующие токи и потокосцепления на прямо и обратно бегущие, получим прямой ток

$$\dot I'_1 = \frac{1}{2}(\dot I_{d1} + j\dot I_{q1}) \tag{79}$$

и обратный ток

$$\dot I''_1 = \frac{1}{2}(\dot I_{d1} - j\dot I_{q1}). \tag{80}$$



Прямое потокосцепление

$$\dot\psi'_1 = \frac{1}{2}(\dot\psi_d + j\dot\psi_q) \tag{81}$$

и обратное

$$\dot\psi''_1 = \frac{1}{2}(\dot\psi_d - j\dot\psi_q). \tag{82}$$

Здесь $\dot I_{d1}$ и $\dot I_{q1}$ — векторы тока в продольной и поперечной оси соответственно.

Прямое потокосцепление индуктирует в статоре э. д. с. $E'_1$ частоты сети и совместно с падением напряжения $I'_1 = (r_1 + jx_1)$ в статоре уравновешивает приложенное напряжение $U_1$

$$\dot U_1 = \dot I'_1 (r_1 + jx_1) - \dot E'_1. \tag{83}$$

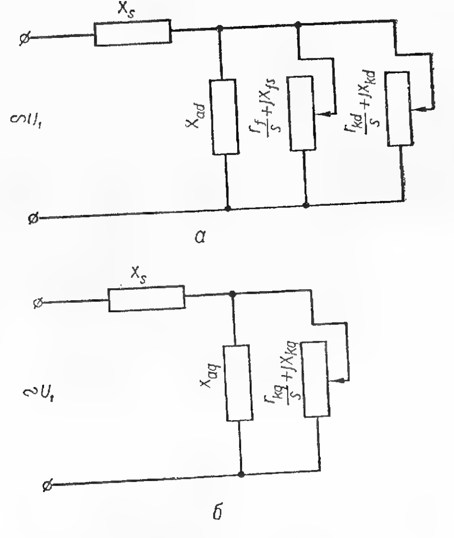



Рис. 271. Схемы замещения без вынесения намагничивающего контура для расчета пусковых характеристик синхронного двигателя:

*а* — продольная ось; *б* — поперечная ось.

Обратное потокосцепление индуктирует в статоре э. д. с. частоты $(1 - s - s = 1 - 2s)$, уравновешенную падением напряжения от тока в статоре (обратное напряжение статора $U'' = 0$), то есть

$$0 = I''_1 [r_1 + jx_1 (2s - 1)] - E''_1 (2s - 1). \tag{84}$$

Величины э. д. с. прямого следования $E'_1$ и обратного следования $E''_1$ могут быть получены аналогично уравнениям (79) и (80), т. е.

$$\dot E'_1 = \frac{1}{2}(\dot E_d + j\dot E_q) \text{ и } E''_1 = \frac{1}{2}(\dot E_d - j\dot E_q). \tag{85}$$

Величины э. д. с. в продольной оси $\dot E_d$ и в поперечной оси $\dot E_q$ могут быть найдены из эквивалентных схем для продольной и поперечной оси (рис. 271) в виде

$$\dot E_d = -\dot I_{d1} \dot z_{ad} \text{ и } j\dot E_q = -\dot I_{q1} \dot z_{aq}, \tag{86}$$

где $\dot z_{ad}$ и $\dot z_{aq}$ — полные сопротивления в продольной и поперечной оси, зависящие от скольжения, определяются по эквивалентным схемам, рис. 271, *а*, *б* — для случая симметричных клеток со стержнями равного сопротивления:

$$\dot z_{ad} = \left(\frac{1}{j\,x_{ad}} + \frac{1}{j\,x_{fs} + \frac{r_{fk}}{s}} + \frac{1}{jx_{kd} + \frac{r_{kd}}{s}}\right)^{-1}, \tag{87}$$

$$\dot z_{aq} = \left(\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{jx_{kq} + \frac{r_{kq}}{s}}\right)^{-1}. \tag{88}$$

Для несимметричных клеток или стержней неравного сопротивления схема замещения усложняется [145].

Из уравнений (79), (80), (85) и (86) следует:

$$\left.\begin{aligned} \dot E_1' &= -\left[\frac{1}{2}(\dot z_{ad} + \dot z_{aq})\,\dot I_1' + \frac{1}{2}(\dot z_{ad} - \dot z_{aq})\,\dot I_1''\right] \\ E_1'' &= -\left[\frac{1}{2}(\dot z_{ad} - \dot z_{aq})\,\dot I_1' + \frac{1}{2}(\dot z_{ad} + \dot z_{aq})\,I_1''\right] \end{aligned}\right\}. \tag{89}$$

Подставляя (89) в (83) и (84), получаем систему уравнений, из которой можно определить $\dot I_1'$ и $\dot I_1''$, то есть прямой и обратный ток:

$$\dot U_1 = \dot I_1'(r_1 + jx_{1s}) - \dot E_1' = \dot I_1'\left[(r_1 + jx_{1s}) + \frac{1}{2}(\dot z_{ad} + \dot z_{aq})\right] + I_1''\,\frac{1}{2}(\dot z_{ad} - \dot z_{aq}); \tag{90}$$

$$0 = \dot I_1''\left(\frac{r_1}{2s-1} + jx_{1s}\right) - \dot E'' = \dot I_1'\,\frac{1}{2}(\dot z_{ad} - \dot z_{aq}) + \dot I_1''\left[\left(\frac{r_1}{2s-1} + jx_{1s}\right) + \frac{1}{2}(\dot z_{ad} + \dot z_{aq})\right]. \tag{91}$$

Складывая первое и второе уравнения системы, а затем вычитая, получим систему в другом виде

$$\left.\begin{aligned} \dot U_1 &= \dot I_1'\dot z_{d1} + \dot I_1''\dot z_{d1}' \\ \dot U_1 &= \dot I_1'\dot z_{q1} - \dot I_1''\cdot\dot z_{q1}' \end{aligned}\right\}, \tag{92}$$

где

$$\dot z_{d1} = r_1 + jx_{1s} + z_{ad};\quad \dot z_{d1}' = \frac{r_1}{2s-1} + jx_{1s} + \dot z_{ad};$$

$$\dot z_{q1} = r_1 + jx_{1s} + \dot z_{aq};\quad \dot z_{q1}' = \frac{r_1}{2s-1} + jx_{1s} + z_{aq}.$$

Решение системы (92) при $\dot U_1 = U_1$

$$\dot I_1' = \frac{\dot z_{d1}' + \dot z_{q1}'}{\dot z_{d1}\dot z_{q1}' + \dot z_{q1}\dot z_{d1}'}\,U_1;\quad \dot I_1'' = \frac{\dot z_{d1} - \dot z_{q1}}{\dot z_{d1}\dot z_{q1}' + \dot z_{q1}\dot z_{d1}'}\,U_1. \tag{93}$$

При $s = 0{,}5$ из последних уравнений следует

$$\dot I' = \frac{U_1}{r_1 + jx_{1s} + \frac{1}{2}(\dot z_{ad} + \dot z_{aq})};\quad I_1'' = 0. \tag{94}$$

При скольжениях $s = 1$; 0,7; 0,3; 0,05 и менее обычно можно пренебречь величинами $r_1$ и $\frac{r_1}{2s-1}$, в особенности для крупных и средних машин, или считать их равными одна другой, то есть $\dot z_{d1}' = \dot z_{d1}$ и $\dot z_{q1}' = \dot z_{q1}$. При этом расчет токов намного упрощается. Вместо (93) получаем:



$$\left.\begin{aligned} \dot I_1' &= \frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{r_1 + jx_{1s} + \dot z_{ad}} + \frac{U_1}{r_1 + jx_{1s} + \dot z_{aq}}\right) = I_{1a}' - jI_{1p}' \\ \dot I_1'' &= \frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{r_1 + jx_{1s} + \dot z_{ad}} - \frac{U_1}{r_1 + jx_{1s} + \dot z_{aq}}\right) = I_{1a}'' - jI_{1p}'' \end{aligned}\right\}. \tag{95}$$

Здесь через $I_{1a}'$, $I_{1p}'$ и $I_{1a}''$, $I_{1p}''$ обозначены вещественные и мнимые части комплексных выражений (95), то есть активные и реактивные составляющие первичного прямого и обратного токов. Величины в скобках представляют сумму $I_{d1} + jI_{q1}$ и разность $I_{d1} - jI_{q1}$ прямого и обратного токов.

Модули прямого и обратного токов

$$I_1' = \sqrt{I_{1a}'^2 + I_{1p}'^2};\quad I_1'' = \sqrt{I_{1a}''^2 + I_{1p}''^2}. \tag{96}$$

Эффективный ток сети

$$I_1 = \sqrt{I_1'^2 + I_1''^2}. \tag{97}$$

### Момент вращения

Момент вращения получим, вычитая из полной подведенной активной мощности $P_a = U_1 I_{1a}'$ потери от прямого тока в статоре $I_1'^2 r_1$ и момент от обратного тока $\left(-I_1''^2\,\frac{r_1}{2s-1}\right)$,

$$M = U_1 I_{1a}' - I_1'^2 r_1 + I_1''^2\,\frac{r_1}{2s-1}. \tag{98}$$

При скольжении $s > 0{,}5$ обратные токи в статоре создают положительный момент, а при $s < 0{,}5$ — отрицательный (тормозящий ротор). В области $s = 0{,}3$; 0,45, а иногда и в области малых скольжений ($s = 0{,}1 - 0{,}02$) наблюдается более или менее заметный провал в кривой момента, величина которого зависит от параметров обмоток и величины тока $I_1''$.

При симметричной пусковой обмотке типа беличьей клетки и разрядном сопротивлении в обмотке возбуждения $\dot z_{ad} \approx \dot z_{aq}$, согласно уравнения (95) обратный ток $I_1''$ и провал получаются малыми.

В отдельных случаях, если активное сопротивление демпферной обмотки велико и обмотка возбуждения замкнута накоротко, могут получиться нежелательные провалы в кривой момента вблизи входного скольжения. Чтобы избежать этого, следует увеличить сечение колец и стержней или вводить разрядное сопротивление и обмотку возбуждения.

### Упрощение расчетов токов $I_1'$ и $I_1''$ при пуске

Расчет токов может быть упрощен, если вынести намагничивающие контуры на зажимы (рис. 272).

Согласно этим схемам

$$\dot I_{d1} = \dot I_{d0} + \dot I_d \text{ и } \dot I_{q1} = \dot I_{q0} + \dot I_q, \tag{99}$$

где

$$\dot I_{d0} = \frac{\dot U}{jc_{1d}x_{ad}} = \frac{\dot U}{jx_d};\quad \dot I_d = \frac{U}{z_d};\quad \bar c_{1d} = 1 + \frac{x_{1s}}{x_{ad}};$$

$$\dot z_d = c_{1d}r_1 + jc_{1d}x_{1s} + \frac{(r_{fk} + jx_{fs})\left(\frac{r_{kd}}{s} + jx_{kd}\right)}{\frac{r_{kd} + r_{fk}}{s} + j(x_{kd} + x_{fs})}\,c_{1d}^2;$$

$$\dot I_{q0} = \frac{\dot U_1}{jc_{1q}x_{aq}} = \frac{\dot U_1}{jx_q};\quad \dot I_q = \frac{\dot U_1}{z_q};\quad c_{1q} = 1 + \frac{x_{1s}}{x_{aq}};$$

$$\dot{z}_q = c_{1q} r_1 + jc_{1q} x_{1s} + \left(\frac{r_{kq}}{s} + jx_{kq}\right) c_{1q}^2.$$

Для удобства расчета и анализа зависимости пусковых характеристик от соотношений параметров введем следующие обозначения:

$$\alpha = \frac{r_{fk}}{r_{kd}}; \ \beta = \frac{x_{fs}}{r_{fk}}; \ \gamma = \frac{x_{kd}}{x_{fs}}; \ r_{fk} = r_f(1+k), \tag{99a}$$

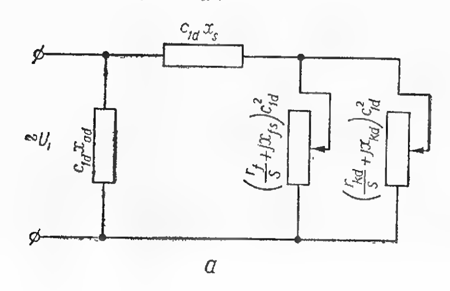
где $k$ — кратность дополнительного сопротивления в цепи возбуждения.

Тогда

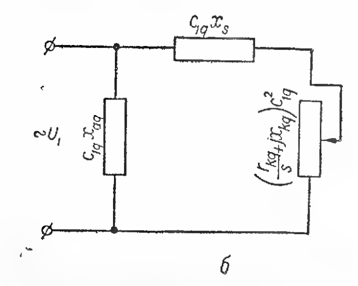
$$\dot{z}_d = c_{1d} r_1 + \frac{r_{kd} c_{1d}^2 c_r(s)}{s} + j\,[x_{1s} c_{1d} + x_{fs} c_{1d}^2 c_x(s)]; \tag{100}$$

$$\dot{z}_q = c_{1q} r_1 + \frac{r_{kq} c_{1q}^2}{s} + j\,(x_{1s} c_{1q} + x_{kq} c_{1q}^2); \tag{101}$$

$$c_r(s) = \frac{1 + \frac{1}{\alpha} + \beta^2 s^2 (1 + \gamma^2 \alpha)}{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2 s^2 (1+\gamma)^2}; \tag{102}$$




а




б

Рис. 272. Схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром для расчета пусковых характеристик синхронного двигателя:
а — продольная ось; б — поперечная ось.

$$c_x(s) = \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2 s^2 \gamma (1+\gamma) + \gamma}{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2 s^2 (1+\gamma)^2}, \tag{103}$$

$c_r(s)$ и $c_x(s)$ являются функциями отношений параметров $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ и скольжения.

При отсутствии пусковой обмотки:

$$r_{kd} \to \infty; \ \alpha \to 0; \ c_r(s) \to \alpha;$$
$$r_{kd}\, c_r(s) = r_{fk}; \ c_x(s) \to 1; \ r_{kq} \to \infty.$$



Определив соотношение $\dot{z}_d$ и $z_q$, находим

$$\dot{I}_d = \frac{U_1}{z_d} = I_{da} - jI_{dp} \quad \text{и} \quad \dot{I}_q = \frac{U}{z_q} = I_{qa} - jI_{qp}; \tag{104}$$

затем прямой ток

$$\dot{I}' = \frac{U_1}{2}\left(\frac{1}{\dot{z}_a} + \frac{1}{\dot{z}_q}\right) = I'_a - jI'_p; \tag{105}$$

обратный ток

$$I'' = \frac{U_1}{2}\left(\frac{1}{\dot{z}_d} - \frac{1}{\dot{z}_q}\right) = I''_a - jI''_p \tag{106}$$

и момент вращения

$$M = UI'_a - I'^2_a r_1 c_1 + (I''^2_a + I''^2_p)\frac{r_1 c_1}{2s-1}, \tag{107}$$

где

$$c_1 = \frac{1}{2}(c_{1d} + c_{1q}).$$

Полный пусковой ток сети

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(I_{dp} + \frac{U}{x_d}\right)^2 + \left(I_{qp} + \frac{U}{x_q}\right)^2 + I_{da}^2 + I_{qa}^2\right]}. \tag{108}$$

### Ток в обмотке возбуждения

При пуске в обмотке возбуждения и в демпферной обмотке возникают токи частоты скольжения, величина которых может быть найдена из эквивалентной схемы (рис. 272). Ток в обмотке возбуждения

$$\dot{I}_f = I_d\left[\frac{r_{kd} + jsx_{kd}}{r_{kd} + r_{fk} + js(x_{kd} + x_{fs})}\right], \tag{109}$$

модуль тока

$$I_f = \sqrt{(I'_a + I''_a)^2 + (I'_p + I''_p)^2} \cdot \sqrt{\frac{r_{kd}^2 + s^2 x_{kd}^2}{(r_{kd} + r_{fk})^2 + s^2(x_{kd} + x_{fs})}}. \tag{110}$$

При $s = 1$ $\quad I_f \approx I_d \dfrac{x_{kd}}{x_{kd} + x_{fs}}$.

Амплитуда переменного тока возбуждения частоты скольжения по (42) и (100) в амперах

$$i_{fA} = I_f(i_{f\delta} x_{ad}) = I_f \frac{F_{1N} k_d}{w_f}. \tag{111}$$

### Ток в демпферной обмотке

По эквивалентной схеме рис. 272

$$I_{kd} = I_d\left[\frac{r_{fk} + jsx_{fs}}{(r_{fk} + r_{kd}) + js(x_{kd} + x_{fs})}\right], \tag{112}$$

модуль тока

$$I_{kd} = \sqrt{(I'_{1a} + I''_{1a})^2 + (I'_{1p} + I''_{1p})^2}\sqrt{\frac{r_{fk}^2 + s^2 x_{fs}^2}{(r_{fk} + r_{kd})^2 + s^2(x_{kd} + x_{fs})^2}}. \tag{113}$$

Ток в амперах (амплитуда) в одном стержне получим из равенства

$$\frac{2}{\pi} i_{kd\,\max} n_c = 2F_{1N} I_{hd},$$

где $F_{1N}$ — амплитуда м. д. с. статорной обмотки при $I_1 = I_{1N}$;
$n_c$ — число стержней на полюс;

$$i_{kd\,\max} = \frac{\pi}{n_c} E_{1N} I_{hd}. \qquad (114)$$

При этом предполагается синусоидальное распределение токов в стержнях. В действительности при асинхронном режиме токи в крайних стержнях получаются значительно больше, чем в средних. Для уравнивания токов и потерь в стержнях крайние стержни следовало бы помещать в более глубокие или в закрытые пазы для увеличения индуктивного сопротивления или делать их из материала повышенного сопротивления. То и другое представляет конструктивное неудобство и поэтому редко применяется.

Особенности расчета пусковой характеристики при пуске с наглухо включенным возбудителем. Расчет пускового момента и тока при $s = 1$ производится аналогично рассмотренному случаю пуска при замкнутом на разрядное сопротивление роторе. Необходимо только при определении $r_{fk}$ по формуле (99а) в качестве $k$ подставить отношение сопротивления якоря возбудителя к сопротивлению обмотки ротора синхронной машины. Поскольку якорь возбудителя имеет малое сопротивление, получится малая величина $r_{fk}$ и соответственно меньшая величина пускового момента при $s = 1$.

По мере разгона двигателя появляется э. д. с. возбудителя (если последний начнет возбуждаться при некотором скольжении $s$) и ток в статоре частоты $(1 - s)$. Этот ток вызовет средний тормозной (отрицательный) момент

$$M_h \approx -\frac{E_f^2 r_1 (1 - s)}{x_d^2 (1 - s)^2 + r_1^2},$$

где $E_f$ — э. д. с. возбуждения в долях единицы (при частоте $f = 1$) или пропорциональный ей ток возбуждения. Этот момент необходимо прибавить к моменту по (107), вследствие чего общая величина момента уменьшится. Кроме того, появится пульсационный момент от тока возбуждения $M \approx \frac{E_f U}{x_d} \sin st$, среднее значение которого равно нулю. В результате условия пуска несколько ухудшатся, в особенности в случаях больших величин $r_1$, малых величин момента по (107) и большой длительности пуска (пуск под нагрузкой при больших маховых моментах ротора двигателя и приводного механизма).

## 12-26. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И РАЗМЕРОВ ПУСКОВОЙ ОБМОТКИ

Пусковая клетка в двигателях может быть выбрана по заданным условиям пуска: пусковому моменту $M_п$, пусковому току $I_п$, и входному моменту $M_{вх}$. Шаг пусковой клетки выбирается как указано в § 12-19.



Число стержней на полюс

$$n_c \approx \frac{b_р}{t_к} = \text{ц. ч.} \left(\text{либо } n_c \approx \frac{b_р - t_к}{t_к} = \text{ц. ч.}\right). \qquad (115)$$

Пусковой момент синхронного двигателя (приближенно)

$$M_п \approx r_{2п} \left(\frac{I_{2п}}{c_1}\right)^2, \qquad (116)$$

где $r_{2п}$ — эквивалентное активное сопротивление роторных цепей при $s = 1$.

Пусковой ток ротора

$$\frac{I_{2п}}{c_1} = I_{1п} - \frac{U}{2}\left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q}\right).$$

Из уравнения (116) эквивалентное активное сопротивление ротора при $s = 1$

$$r_{2п} = \frac{M_п}{\left(\frac{I_{2п}}{c_1}\right)^2}.$$

Ориентировочно сопротивление пусковой клетки в продольной оси по (100) и (101) можно определить, принимая

$$r_{2п} \approx 0{,}5\,[r_{hd} c_r(1)\, c_{1d} + 0{,}75 r_{hd}\, c_{1q}],$$

то есть

$$r_{hd} = \frac{2r_{2п}}{c_r(1)\, c_{1d} + 0{,}75 c_{1q}}.$$

При этом по (102) можно принять для обычных соотношений параметров $c_r(1) \approx 0{,}4 - 0{,}5$.

Далее необходимо оценить величину $r_{hd}$ по желаемой величине входного момента, а также по условиям допустимого провала момента при малых скольжениях.

Момент синхронного двигателя в области скольжений $0 < s < 0{,}1$ с достаточным приближением может быть получен в виде:

$$M = \frac{1}{2}\left(I_d^2 \frac{r_{hd}\, c_{1d}\, c_r(s)}{s} + I_q^2 \frac{r_{kq}\, c_{1q}^2}{s}\right) - \frac{1}{2}(I_d^2 + I_q^2)\, r_1. \qquad (117)$$

Полагая при полных клетках $r_{kq} = 0{,}75 r_{hd}$ и $x_{kq} = 0{,}75 x_{hd}$ и принимая по (102) при малых $s$

$$c_x(s) \approx \left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^2; \quad c_r(s) = \frac{\alpha}{1+\alpha} = \frac{r_{fk}}{r_{fk} + r_{hd}}; \quad r_{hd} c_r(s) = \frac{r_{fk}}{1+\alpha},$$

получим:

$$I_d^2 = \frac{U^2}{\left(c_{1d}^2 \frac{r_{fk}}{s} \frac{1}{1+\alpha}\right)^2 + \left[c_{1d} x_{1s} + c_{1d}^2 x_{fs} \left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^2\right]^2};$$

$$I_q^2 = \frac{U^2}{\left(\frac{0{,}75 c_{1q}^2 r_{hd}}{s}\right)^2 + \left(c_{1q} x_{1s} + c_{1q}^2 x_{kq}\right)^2}.$$

Подставляя эти значения в (117) и принимая значения продольной и поперечной реактивностей приблизительно равными $\frac{c_1}{I_{2п}}$, получим:

$$M \approx \frac{U_1^2}{2}\,\frac{s}{r_{fk}}\left\{\frac{1+\alpha}{c_{1d}^2\left[1+\frac{c_1^2 s^2(1+\alpha)^2}{I_{2п}^2 r_{fk}^2}\right]}+\frac{\alpha}{c_{1q}^2\left[1+1{,}34\frac{c_1^2 s^2\alpha}{I_{2п}^2 r_{fk}^2}\right]}\right\}-$$

$$-\frac{U_1^2 s^2 r_1}{2r_{fk}^2}\left\{\frac{(1+\alpha)^2}{c_{1d}^2\left[1+\frac{c_1^2 s^2(1+\alpha)^2}{I_{2п}^2 r_{fk}^2}\right]}+\frac{\alpha}{c_{1q}^2\left[1+1{,}34\frac{r_1^2 s^2\alpha^2}{I_{2п}^2 r_{fk}^2}\right]}\right\}. \qquad (118)$$

Пользуясь последним уравнением, можно легко построить кривую $M(s)$ в области малых скольжений и проверить допустимость принятых величин $r_{fk}=r_f(1+k)$ и $\alpha=\frac{r_{fk}}{r_{kd}}$ как по минимуму момента, так и по заданному значению входного момента при $s = s_{вх}$.

Если пренебречь моментом от потерь в статоре, то

$$M \approx \frac{U_1^2}{2}\,\frac{s}{r_{fk}}\left\{\frac{1+\alpha}{c_{1d}^2\left[1+\frac{c^2 s^2(1+\alpha)}{I_{2п}^2 r_{fk}^2}\right]}+\frac{\alpha}{c_{1q}^2\,\frac{1{,}34 c_1^2 s^2\alpha^2}{I_{2п}^2 r_{fk}^2}}\right\}. \qquad (119)$$

Входной момент получится подстановкой в (119) $s = s_{вх}$ или $s = s_{кр}$ — критического скольжения (§ 12-27).

Максимум $M_{вх}$ при данном значении $r_{fk}$ получится при $\alpha \approx 0{,}5$. Обычно достаточные значения получаются при $\alpha \approx 0{,}2$. Задавшись кратностью разрядного сопротивления $k$ и величиной $\alpha$ $(0{,}2 < \alpha < 0{,}5)$, по уравнению (119) определяем величину входного момента. Если получим $M_{вх}$, сильно отличающийся от заданного, то необходимо либо изменить кратность пускового сопротивления, либо коэффициент $\alpha$ и пересчитать величину $M_{вх}$. Получив близкий к заданному результат, определяем

$$r_{kd} = \frac{r_{fk}}{\alpha}. \qquad (120)$$

Если при этом получим $r_{kd}$ больше, чем по (117), то принимаем это значение, если же меньше, то для получения заданной кратности $M_п$ необходимо соответственно изменить величину кратности $I_п$.

Сечение стержней на полюс по (62)

$$\sum q_с = \rho_{75}\,\frac{F_{1N}\rho_с' l_с(1+k_л)}{r_{kd} f \Phi_N}, \qquad (121)$$

где

$$k_л = \frac{0{,}4D_л}{pl_с}\,\frac{\rho_л'}{\rho_с'};$$



$D_л$ — диаметр короткозамыкающего кольца (см. рис. 249);

$\rho_с'$ — отношение удельного сопротивления стержня к удельному сопротивлению меди.

$\rho_л'$ — то же, для кольца.

Выбираем по § 12-19 материал стержней и колец и по (121) определяем сечение и диаметр стержней.

## 12-27. НАГРЕВ ПРИ ПУСКЕ И ВРЕМЯ СИНХРОНИЗАЦИИ

Нагрев клетки. Определяем полный вес клетки $G$ и ее теплоемкость $C = cG$, где $c$ — удельная теплоемкость материала клетки (табл. 7).

Нагрев клетки за один пуск без учета теплоотдачи § 6-9

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{2} P_N T_j\left(\frac{M}{\Delta M}\right)_{ср}\frac{1}{C}\ ^\circ\mathrm{C}$$

или

$$\Delta\theta \approx \frac{0{,}4 I_п^2 r_{kd} t_п}{C} P_N, \qquad (122)$$

где $P_N$ — *вт*, $t_п$ — время пуска, сек., $I_п$ и $r_{kd}$ — *д. е.*

Инерционная постоянная рассчитывается по § 12-7. Среднее значение отношения момента вращения $M$ к ускоряющему моменту $\Delta M = M - M_в$ зависит от типа привода. При ориентировочных расчетах может быть принято

$$\left(\frac{M}{\Delta M_{ср}}\right) \approx 2 \div 4.$$

При пусках под нагрузкой $\left(\frac{M}{\Delta M}\right)_{ср}$ может быть значительно выше.

Нагрев массивных полюсов

$$\Delta\theta \approx 0{,}65 w \sqrt{t_п}; \qquad (123)$$

$$w = \frac{0{,}4 A_N B_{\delta N} v_a}{\sqrt{2}} M_п \ вт/см^2, \qquad (124)$$

где $v_a = \pi D n$ *см/сек*;

$M_п$ — кратность момента при $s = 1$;

$t_п$ — время пуска двигателя по формуле (174) гл. 6

$$t_п = T_j\left(\frac{1}{\Delta M}\right)_{ср} \approx \frac{T_j}{\Delta M_{ср}}; \qquad (125)$$

$\Delta M_{ср}$ — относительный средний ускоряющий момент (в зависимости от типа привода от 0,25 до 0,5). При пусках под нагрузкой $\Delta M_{ср}$ может быть 0,1—0,2.

Таблица 82

## Основные данные построенных синхронных явнополюсных машин

| $P_{эN}$ (в квт) | $U_л$ (в в) | $n_N$ (в об/мин) | $\eta$ (в %) | $\cos\varphi$ | $i_{fN}$ (в а) | СТАТОР $D_{i1}$ (в см) | $D$ (в см) | $l$ (в см) / $n_s$ | $Z_1$ | $\frac{b_п}{b_о}\times\frac{h_п}{h}$ (в см) | $S_п/a$ | $\frac{a\times b}{a'\times b'}$ (в мм) | $y_п$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 64 | 400 | 1000 | 90,0 | 0,8 | 90 | 56 | 40,5 | 19/3 | 45 | 1,22/0,63 × 3,15/2,72 | 8/1 | 4,4×2,4 / 4,7×2,7 · 2 | 1—7 |
| 1920 | 6000 | 1000 | 95,6 | 0,8 | 250 | 140 | 96,5 | 59/11 | 72 | 1,67/— × 8,5/8,1 | 18/2 | 4,7×2,83 / 5,0×3,13 · 2 | 1—11 |
| 3800 | 6000 | 1000 | 95,0 | 0,8 | 510 | 165 | 120 | 85/18 | 108 | 1,7/— × 8,5/8,0 | 4/1 | 4,4×3,28 / 4,7×3,58 · 8 | 1—16 |
| 100 | 400 | 750 | 90,3 | 0,8 | 100 | 65 | 48,5 | 25/4 | 72 | 0,91/0,48 × 3,5/3,12 | 7/2 | 3,28×2,83 / 3,58×3,13 · 2 | 1—10 |
| 600 | 6000 | 750 | 92 | 0,9 | 210 | 140 | 110 | 29/5 | 126 | 1,45/— × 6,74/6,34 | 16/1 | 6,9×1,95 / 7,17×2,22 · 1 | 1—14 |
| 1320 | 6000 | 750 | 94,7 | 0,8 | 280 | 140 | 104 | 49/9 | 108 | 1,25/— × 6,85/6,5 | 18/2 | 6,4×2,26 / 6,7×2,56 | 1—12 |
| 176 | 525 | 600 | 91,3 | 0,8 | 146 | 73 | 56,5 | 34/6 | 72 | 1,0/0,52 × 3,75/3,37 | 7/2 | 3,8×3,28 / 4,1×3,58 · 2 | 1—8 |
| 1500 | 6300 | 600 | — | 0,8 | 236 | 170 | 124 | 49/9 | 108 | 1,55/— × 8,5/8,0 | 10/1 | 4,1×2,44 / 4,4×2,74 · 4 | 1—10 |
| 6550 | 6000 | 600 | 96,8 | 0,8 | 617 | 213 | 162 | 102/19 | 108 | 1,45/— × 10,3/9,7 | 6/2 | 6,9×3,8 / 7,2×4,1 · 3 | 1—10 |
| 350 | 6300 | 500 | — | 0,8 | 206 | 140 | 113 | 29/5 | 144 | 1,3/— × 7,0/6,7 | 22/1 | 5,9×1,56 / 6,05×1,7 · 1 | 1—11 |
| 1300 | 6000 | 500 | 94,5 | 0,9 | 252 | 213 | 166 | 24/4 | 126 | 1,45/— × 10,5/9,95 | 14/1 | 6,9×2,44 / 7,08×2,62 · 2 | 1—10 |
| 4600 | 6300 | 500 | 96,6 | 0,8 | 568 | 213 | 166 | 74/14 | 126 | 1,64/— × 10,8/10,2 | 8/2 | 6,4×2,83 / 6,7×3,13 · 3 | 1—11 |
| 65 | 380 | 375 | 83,5 | 0,7 | 70 | 85 | 70 | 20/3 | 84 | 1,1/0,57 × 4,03/3,6 | 10/2 | 3,8×2,83 / 4,1×3,13 · 2 | 1—6 |
| 445 | 6000 | 375 | 92,0 | 0,8 | 136 | 140 | 116 | 34/6 | 180 | 1/— × 6,4/6,0 | 15/1 | 3,8×2,44 / 4,1×2,74 · 1 | 1—11 |
| 2000 | 6000 | 375 | 94,5 | 0,8 | 350 | 213 | 180 | 59/11 | 180 | 1,45/— × 8,04/7,64 | 6/1 | 6,9×2,83 / 7,2×3,13 · 3 | 1—10 |
| 88 | 525 | 300 | 86,5 | 0,8 | 89 | 99 | 86 | 20/3 | 108 | 1,15/— × 3,5/3,1 | 6/1 | 4,1×1,81 / 4,35×2,06 · 4 | 1—6 |
| 200 | 400 | 300 | — | 0,8 | 114 | 213 | 188 | 11/1 | 180 | 1,15/— × 6,7/6,3 | 12/4 | 6,9×2,83 / 7,2×3,13 · 1 | 1—8 |

| $P_{эN}$ (в квт) | $l_{\omega 1}$ (в см) | $\delta$ (в см) | РОТОР $l_p = l_m$ (в см) | $b_p$ (в см) | $h_p$ (в см) | $b_m$ (в см) | $h_m$ (в см) | $R_p$ (в см) | $w_f$ | $a_{Cu}\times b_{Cu}$ (в мм) | $l_{wf}$ (в см) | $a$ | $n_c$ / материал | $d_c$ (в см) | $q_л$ (в см²) | $l_{кd}$ (в см) | $b_{ок}/h_{ок}$ (в см) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 64 | 105 | 0,18 | 21 | 15,2 | 2,3 | 8 | 7,3 | 19 | 46,5 | 22×1,08 | 70 | 1 | — | — | — | — | — |
| 1920 | 274 | 1,1 | 59 | 34,4 | 6 | 19,5 | 15,5 | 44 | 66,5 | 55×1,68 | 181 | 1 | 11/лат. | 1,6 | 8,0 | 82 | 0,3/0,3 |
| 3800 | 370 | 1,5 | 85 | 41,5 | 6,5 | 26 | 19 | 48,6 | 48,5 | 45×3,05 | 234 | 1 | 10/лат. | 2,0 | 6,0 | 106 | 0,3/0,3 |
| 100 | 123 | 0,17 | 25 | 14,3 | 2,4 | 8,6 | 6,8 | 22,5 | 41,5 | 19,5×1,16 | 77,5 | 1 | — | — | — | — | — |
| 600 | 212 | 0,45 | 29 | 29,2 | 5,0 | 16,4 | 16 | 46,0 | 48,5 | 19,5×1,16 | 105,5 | 1 | 11/медь | 1,4 | 6,8 | 39 | 0,2/0,2 |
| 1320 | 231 | 0,9 | 54 | 29,2 | 5,0 | 16,4 | 16 | 46 | 62,5 | 40×1,95 | 148 | 1 | 11/лат. | 1,4 | 6,0 | 63 | 0,3/0,3 |
| 176 | 135 | 0,16 | 35 | 13,3 | 2,2 | 8,2 | 7,5 | 25,5 | 28,5 | 18×1,95 | 97 | 1 | — | — | — | — | — |
| 1500 | 232 | 0,8 | 49 | 29,2 | 5,0 | 16,4 | 16 | 46 | 57,5 | 40×2,1 | 176 | 1 | — | — | — | — | — |
| 6550 | 358 | 1,2 | 102 | 36,5 | 5,5 | 24,5 | 20 | 58,5 | 44,5 | 50×3,53 | 283 | 1 | 10/лат. | 1,6 | 8,0 | 122 | 0,3/0,3 |
| 350 | 177 | 0,45 | 29 | 22,6 | 3,6 | 13,5 | 13 | 36,5 | 33,5 | 22×2,83 | 103 | 1 | — | — | — | — | — |
| 1300 | 193 | 0,7 | 30 | 31 | 4,5 | 20 | 17 | 64 | 51,5 | 19,5×2,44 | 104,4 | 1 | 9/медь | 1,4 | 6,8 | 38 | 0,4/0,2 |
| 4600 | 301 | 1,0 | 75 | 32,2 | 5 | 22 | 18,5 | 69,5 | 44,5 | 45×3,28 | 222 | 1 | 7/лат. | 1,1 | 3,2 | 95 | 0,3/0,3 |
| 65 | 103 | 0,14 | 21 | 10,3 | 1,7 | 6,5 | 8,5 | 29,5 | 50,5 | 13,5×1,25 | 61 | 1 | 5/медь | 0,6 | 0,7 | 30 | 0,15/0,1 |
| 445 | 179 | 0,4 | 35 | 16,4 | 3 | 9,6 | 15 | 48 | 64,5 | 19,5×1,68 | 106 | 1 | 7/лат. | 1,1 | 3,2 | 46 | 0,3/0,3 |
| 2000 | 238 | 1,3 | 62 | 25 | 4,5 | 16 | 17,5 | 46 | 44,5 | 35×3,0 | 166,4 | 1 | 10/лат. | 1,4 | 7,5 | 72 | 0,3/0,3 |
| 88 | 100 | 0,2 | 22,5 | 9,5 | 1,7 | 5,5 | 11,0 | 35 | 47,5 | 16,8×1,68 | 67 | 1 | 4/медь | 0,7 | 0,7 | 32 | 0,2/0,15 |
| 200 | 110 | 0,4 | 12 | 22 | 3 | 16 | 16,5 | 73 | 51,5 | 12,5×2,1 | 63,5 | 1 | — | — | — | — | — |

**СТАТОР**

| $P_{эN}$ (в *квт*) | $U_л$ (в *в*) | $n_N$ (в об/мин) | $\eta$ (в %) | $\cos\varphi$ | $i_{fN}$ (в *а*) | $D_{j_1}$ (в *см*) | $D$ (в *см*) | $\frac{l\text{ (в см)}}{n_s}$ | $Z_1$ | $\frac{b_п}{b_0}\times\frac{h_п}{h}$ (в *см*) | $\frac{S_п}{a}$ | $\frac{a\times b}{a'\times b'}$ (в *мм*) | $y_п$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 424 | 400 | 300 | — | 0,8 | 240 | 140 | 115 | $\frac{39}{7}$ | 90 | $\frac{1,21}{—}\times\frac{6,2}{5,8}$ | $\frac{18}{10}$ | $\frac{4,4\times2,44}{4,7\times2,74}\cdot2$ | 1—5 |
| 200 | 400 | 250 | 91,8 | 0,8 | 110 | 213 | 188 | $\frac{15}{2}$ | 180 | $\frac{1,15}{—}\times\frac{6,7}{6,3}$ | $\frac{10}{4}$ | $\frac{6,9\times2,83}{7,2\times3,13}\cdot1$ | 1—7 |
| 500 | 6300 | 250 | 92,3 | 0,8 | 153 | 213 | 180 | $\frac{24}{4}$ | 180 | $\frac{1,45}{—}\times\frac{8,05}{7,69}$ | $\frac{20}{1}$ | $\frac{6,9\times2,1}{7,08\times7,28}\cdot1$ | 1—7 |
| 2100 | 10000 | 250 | 95,5 | 0,9 | 357 | 325 | 280 | $\frac{29}{5}$ | 216 | $\frac{1,9}{—}\times\frac{10,5}{10}$ | $\frac{14}{1}$ | $\frac{4,7\times2,1}{4,88\times2,28}\cdot4$ | 1—9 |
| 208 | 400 | 187,5 | — | 0,8 | 97 | 170 | 148 | $\frac{19}{3}$ | 162 | $\frac{1,27}{—}\times\frac{7,1}{6,7}$ | $\frac{24}{8}$ | $\frac{4,1\times1,45}{4,35\times1,7}\cdot2$ | 1—6 |
| 380 | 6000 | 187,5 | 92,5 | 0,8 | 160 | 213 | 186 | $\frac{34}{6}$ | 180 | $\frac{1,45}{—}\times\frac{6,5}{6,1}$ | $\frac{16}{1}$ | $\frac{6,9\times1,81}{7,17\times2,08}\cdot1$ | 1—6 |
| 232 | 525 | 166,7 | 91,6 | 0,8 | 110 | 170 | 151 | $\frac{24}{4}$ | 162 | $\frac{1,27}{—}\times\frac{5,4}{5,0}$ | $\frac{8}{2}$ | $\frac{4,7\times2,26}{5\times2,56}\cdot4$ | 1—4 |
| 625 | 6000 | 166,7 | 92,2 | 0,9 | 260 | 260 | 230 | $\frac{24}{4}$ | 216 | $\frac{1,4}{—}\times\frac{8,5}{8,1}$ | $\frac{18}{1}$ | $\frac{6,9\times2,83}{7,23\times3,16}\cdot1$ | 1—6 |
| 456 | 400 | 125 | — | 0,8 | 197 | 250 | 225 | $\frac{24}{4}$ | 270 | $\frac{0,98}{—}\times\frac{5,4}{5,05}$ | $\frac{4}{3}$ | $\frac{3,28\times1,95}{3,53\times2,2}\cdot10$ | 1—6 |
| 1100 | 6000 | 125 | 96,5 | 0,9 | — | 375 | 345 | $\frac{24}{4}$ | 270 | $\frac{1,55}{—}\times\frac{8}{7,5}$ | $\frac{4}{1}$ | $\frac{5,5\times1,45}{5,75\times1,7}\cdot4$ | 1—6 |
| 4000 | 6000 | 125 | 97,5 | 0,9 | 326 | 425 | 390 | $\frac{67}{11}$ | 270 | $\frac{1,6}{—}\times\frac{9,5}{9,0}$ | $\frac{8}{2}$ | $\frac{3,8\times2,44}{4,1\times2,74}\cdot6$ | 1—5 |
| 6000 | 6300 | 125 | — | 0,8 | 475 | 525 | 485 | $\frac{57}{10}$ | 360 | $\frac{1,75}{—}\times\frac{10,8}{10,3}$ | $\frac{6}{2}$ | $\frac{4,1\times2,44}{4,28\times2,82}\cdot10$ | 1—7 |
| **Гидрогенераторы** | | | | | | | | | | | | | |
| 20000 | 10500 | 150 | 96,2 | 0,85 | 810 | 576 | 514,5 | $\frac{125}{23}$ | 336 | $2,15\times\frac{15,0}{14,1}$ | $\frac{2}{1}$ | $\frac{5,1\times2,44}{8,4\times2,74}\cdot36$ | 1—8 |
| 32000 | 10500 | 100 | 96,4 | 0,8 | 1160 | 854 | 797 | $\frac{120}{21}$ | 396 | $2,55\times\frac{14,1}{13,2}$ | $\frac{6}{4}$ | $\frac{6,9\times2,44}{7,2\times2,74}\cdot12$ | 1—9 |
| 56000 | 10500 | 375 | 97,5 | 0,85 | 890 | 465 | 390 | $\frac{210}{38}$ | 180 | $2,6\times\frac{14,9}{14}$ | $\frac{2}{2}$ | $\frac{7,4\times2,63}{7,7\times2,93}\cdot36$ | 1—9 |
| 57200 | 13800 | 62,5 | 96,8 | 0,8 | 1300 | 1340 | 729 | $\frac{150}{26}$ | 684 | $2,64\times\frac{12,8}{11,9}$ | $\frac{2}{2}$ | $\frac{6,9\times2,44}{7,2\times2,74}\cdot30$ | 1—7 |
| 83000 | 13800 | 83,3 | 97,2 | 0,8 | 1270 | 1160 | 1100 | $\frac{180}{31}$ | 486 | $2,75\times\frac{17}{16,1}$ | $\frac{2}{2}$ | $\frac{7,4\times2,63}{7,7\times2,93}\cdot42$ | 1—9 |

**РОТОР**

| $P_{эN}$ (в *квт*) | $l_{w_1}$ (в *см*) | $\delta$ (в *см*) | $l_p=l_m$ (в *см*) | $b_p$ (в *см*) | $h_p$ (в *см*) | $b_m$ (в *см*) | $h_m$ (в *см*) | $R_p$ (в *см*) | $w_f$ | $a_{Cu}\times b_{Cu}$ (в *мм*) | $l_{wf}$ (в *см*) | $a$ | $\frac{n_c}{\text{материал}}$ | $d_c$ (в *см*) | $q_л$ (в *см*²) | $l_{кd}$ (в *см*) | $\frac{b_{ок}}{h_{ок}}$ (в *см*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 424 | 146 | 0,25 | 40 | 13,5 | 2 | 9,7 | 1,16 | — | 23,5 | 18×3,8 | 114 | 1 | — | — | — | — | — |
| 200 | 110 | 0,4 | 17 | 17,5 | 3 | 12,5 | 15,5 | 70 | 45,5 | 12,5×2,1 | 69 | 1 | — | — | — | — | — |
| 500 | 139 | 0,4 | 25 | 17,5 | 3 | 12,5 | 15,5 | 70 | 48,5 | 14,5×2,44 | 86 | 1 | — | — | — | — | — |
| 2100 | 220 | 1,0 | 32 | 27,8 | 5 | 19 | 20 | 75 | 41,5 | 25×3,8 | 118 | 1 | $\frac{9}{\text{медь}}$ | 1,2 | 6,0 | 40 | $\frac{0,5}{0,2}$ |
| 208 | 110 | 0,24 | 20 | 10,2 | 1,8 | 7,3 | 13 | — | 50,5 | 14,5×1,95 | 67 | 1 | — | — | — | — | — |
| 380 | 152 | 0,35 | 34+2,4 | 13,5 | 2,6 | 10,2 | 15,4 | 51 | 35,5 | 14,5×3,05 | 96 | 1 | $\frac{5}{\text{лат.}}$ | 1,3 | 2,5 | 48 | $\frac{0,2}{0,2}$ |
| 232 | 99,5 | 0,24 | 25,5 | 9,8 | 1,6 | 6,5 | 13 | — | 41,5 | 13,5×2,44 | 72 | 1 | — | — | — | — | — |
| 625 | 138 | 0,4 | 26 | 15,6 | 2,5 | 16,2 | 13,5 | 58 | 27,5 | 14,5×3,8 | 81 | 1 | $\frac{6}{\text{медь}}$ | 1,0 | 2,5 | 34 | $\frac{0,3}{0,2}$ |
| 456 | 108,5 | 0,3 | 26 | 10,5 | 1,8 | 7 | 12 | — | 30,5 | 19,5×3,05 | 77,5 | 1 | — | — | — | — | — |
| 1100 | 126 | 0,5 | 24 | 15,5 | 3,4 | 11,5 | 14,5 | 71 | — | 22×1,95 | 87,2 | 1 | $\frac{6}{\text{лат.}}$ | 1,2 | 3,0 | 38 | $\frac{0,3}{0,3}$ |
| 4000 | 223 | 0,55 | 68 | 18 | 3 | 14 | 15,5 | 120 | 31,5 | 26,3×3,8 | 182,5 | 1 | $\frac{6}{\text{лат.}}$ | 1,4 | 4,5 | 86 | $\frac{0,2}{0,2}$ |
| 6000 | 231 | 1,1 | 57+5 | 23,8 | 3 | 16 | 16,5 | 71,5 | 31,5 | 40×4,1 | 162,6 | 1 | — | — | — | — | — |
| **Гидрогенераторы** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20000 | 505 | 1,2 | 126,6 | 29,5 | 4,6 | 20 | 21 | 101,5 | 21,5 | 46×7,1 | 360 | 1 | $\frac{6}{\text{медь}}$ | 1,8 | 7,6 | 142 | $\frac{0,3}{0,3}$ |
| 32000 | 426 | 1,4 | 110 | 31 | 4,5 | 25 | 27 | 120 | 17,5 | 40×10 | 340 | 1 | $\frac{5}{\text{медь}}$ | 1,8 | 6,4 | 125 | $\frac{0,3}{0,3}$ |
| 56000 | 664 | 2,0 | 197 | 55 | 6 | 40 | 25 | 128,7 | 34,5 | 60×5,5 | 540 | 1 | — | — | — | — | — |
| 57200 | 550 | 2,0 | 141 | 31 | 5 | 23,5 | 29 | 101 | 17,5 | 44×12,5 | 418 | 1 | $\frac{5}{\text{медь}}$ | 2,0 | 9,4 | 156 | $\frac{0,3}{0,3}$ |
| 83000 | 598 | 1,8 | 175 | 34,5 | 5 | 27 | 30 | 127 | 19,5 | 54×11 | 515 | 1 | $\frac{5}{\text{медь}}$ | 2,2 | 9,5 | 192 | $\frac{0,3}{0,3}$ |

Время синхронизации $t_c$ двигателя при включении постоянного тока зависит: а) от момента сопротивления при подсинхронном скольжении $M_в$, б) инерционной постоянной $H = 2\pi f T_i$ двигателя и приводного механизма, в) синхронного момента на единицу скольжения в области малых скольжений $D = \left[\frac{M(s)}{s}\right]_{s\to 0} \approx \frac{M_{вх}}{s_{вх}}$, г) максимума синхронного момента

$$M_{max} = \frac{U_1 i_f x_{ad}}{x_d}; \qquad (126)$$

$$i_f x_{ad} = E_{f1}.$$

Для расчета необходимо вычислить сначала скольжение перед подачей постоянного тока $s_0 = \frac{M_в}{D}$ и критическое скольжение $s_{кр} = \sqrt{\frac{2M_{max}}{H}}$, после чего определяется число периодов $\varkappa$ качаний ротора в процессе синхронизации *

$$\varkappa = \frac{s_0 - \frac{D}{H}\left(\frac{s_{кр}}{s_0}\right)^2}{\frac{\pi D}{H}\left[\left(\frac{s_{кр}}{s_0}\right)^2 - 1\right]} \qquad (127)$$

(при $s_0 = s_{кр}$ синхронизация невозможна).

Среднее скольжение

$$s_{ср} = s_0 + \frac{0{,}5Hs_0^2 + M_{max}}{D\left(2\pi\varkappa + \frac{2}{3}\pi\right)}. \qquad (128)$$

Время синхронизации

$$t_c = \frac{2\pi\varkappa + 1{,}5\pi}{2\pi f s_{ср}} \text{ сек.} \qquad (129)$$

Основные данные синхронных явнополюсных машин приведены в табл. 82.

## *Расчет синхронных неявнополюсных машин*

### 12-28. ПРОЕКТНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Мощность.
2. Частота.
3. Скорость вращения.
4. Напряжение.
5. Коэффициент мощности $\cos\varphi$.
6. О. к. з. (задается заказчиком или подлежит выбору).
7. Условия пуска (в случае двигателя или компенсатора).
8. Ожидаемый или задаваемый к. п. д. (задается или подлежит выбору).
9. Условия нагрузки.
10. Соответствие нормам (по нагреву, форме кривой и т. д.).
11. Особые требования (технические условия).

* И. М. Постников, «Электричество», № 3, 1958.



### 12-29. К. П. Д., ОРИЕНТИРОВОЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ И ВЫБОР О. К. З.

Значение экономического к. п. д. для машины заданной мощности и скорости вращения с учетом только электрических потерь рассмотрено в гл. 2. В быстроходных турбогенераторах к суммарным относительным потерям, оцениваемым по гл. 2 формулой

$$\frac{\Sigma p_э}{P} = k_э\left(\frac{2p}{P}\right)^{1/4},$$

где $k_э \approx 1$ и $P$ — *вт*,
необходимо прибавить относительные механические потери, изменяющиеся по закону

$$\frac{p_m}{P} = \frac{p_v + p_т}{P} = k_m\left(\frac{P}{2p}\right)^n \beta^m,$$

где $k_m$, $n$ и $m$ — постоянные, $\beta = \frac{\tau}{l}$ (§ 2-3).

В крупных машинах сумма механических потерь достигает 40% от суммарных потерь и составляет от 0,5 до 1% мощности машины.

Водородное охлаждение резко уменьшает потери на вентиляцию, в результате чего к. п. д. значительно возрастает. Так, например, в турбогенераторе 50 *Мва* $2p = 2$

$$\frac{\Sigma p_э}{P} = \left(\frac{2}{50 \cdot 10^6}\right)^{1/4} = 0{,}0141,$$

т. е. 1,41% (без добавочных потерь).

При воздушном охлаждении

$$\frac{p_v + p_т}{P} = 0{,}8\%$$

и, следовательно,

$$\frac{\Sigma p}{P} = 2{,}21\%$$

и

$$\eta \approx 97{,}79\%$$

(без учета добавочных потерь).

При водородном охлаждении

$$\frac{p_v + p_т}{P} \approx 0{,}25\%$$

и, следовательно,

$$\frac{\Sigma p}{P} = 1{,}66\%,$$

$$\eta \approx 98{,}34\%.$$

На величину к. п. д. оказывают влияние добавочные потери, которые не учитываются формулой (29), гл. 2. В турбогенераторах старых конструкций добавочные потери значительно превосходили основные потери, в результате чего к. п. д. был намного ниже. В современных конструкциях добавочные потери сведены до 0,25÷

$\div 0{,}5\%$ от $P_N$. Основные мероприятия по снижению добавочных потерь в турбогенераторах:

а) транспозиция и дробление меди в пазу и лобовых частях;

б) применение корзиночной обмотки с сокращенным шагом;

в) выбор соответствующей величины воздушного зазора;

г) применение немагнитных бандажей и немагнитных нажимных плит.

Отношение короткого замыкания (о. к. з.) в турбогенераторах выбирается в пределах $0{,}55 \div 0{,}7$ и может быть 0,5 и ниже для турбогенераторов с форсированным охлаждением.

Перегружаемость по моменту вращения (предел статической устойчивости)

$$M_{\max} = \frac{UE_f}{x_d}; \quad (M_{\max} \approx 1{,}5 \div 1{,}75),$$

где $E_f = i_f x_{ad}$,

$i_f$ — ток возбуждения в относительных единицах. За единицу $i_f$ принимается ток $i_{f(1)}$ по § 12-24

$$i_f = \frac{F_f}{F_{1N}},$$

где $F_f$ — м. д. с. возбуждения, а $F_{1N}$ — м. д. с. якоря при $I = I_N$.

## 12-30. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Основные размеры выбираются по общему методу с дальнейшей проверкой на механические и тепловые условия:

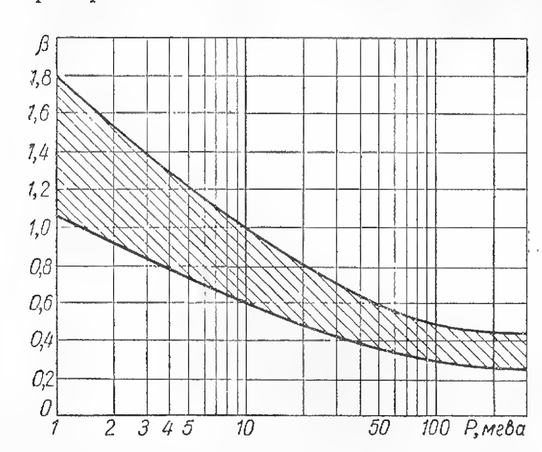



Рис. 273. Коэффициент геометрии полюса для турбогенераторов.

1. Выбираем отношение β по кривым рис. 273 или по § 2-4, 2-5.

2. Выбираем универсальную машинную постоянную статора $C_s$ (или ротора $C_R$). Величину $C_s$ выбираем по табл. 2, стр. 56.

Кроме того, можно определить $C_s$ или $C_R$ по гл. 2, задаваясь практически осуществимыми коэффициентами заполнения $k_\varphi$. Плотность тока в статоре из условий нагрева принимается по табл. 83. Средняя индукция в зубцах статора принимается $(1{,}4 - 1{,}8) \times 10^{-4}$ $вб/см^2$.

3. Если выбрать отношение $\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau}$ (для турбогенераторов $\lambda_1 = 0{,}08 - 0{,}12$) из условий, рассмотренных в гл. 2, то

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P\beta}{2pf\sqrt{2}\lambda_1}}.$$



4. Длина машины

$$l_i = \frac{\tau}{\beta}.$$

Полученные значения должны удовлетворять: а) условиям нагрева ротора*, б) механическим условиям (допустимая окружная скорость по механическим напряжениям в роторе), в) допустимой величине критической скорости. Последняя определяется длиной и диаметром машины (гл. 8). Для цельнокованых роторов из специальной турбороторной стали $\tau_{\max} = 175 \div 190$ *см*. При этом диаметр ротора должен быть не более 110 *см*.

Для шихтованных роторов $\tau < 100 \div 120$ *см*.

Проверка на критическую скорость возможна только после выбора окончательных размеров ротора (гл. 8).

5. Диаметр расточки

$$D = \frac{2p\tau}{\pi}.$$

6. Проверка по машинной постоянной Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 l n}{P}$$

и сравнение с близкими по конструкции машинами—см. рис. 274 и табл. 85.

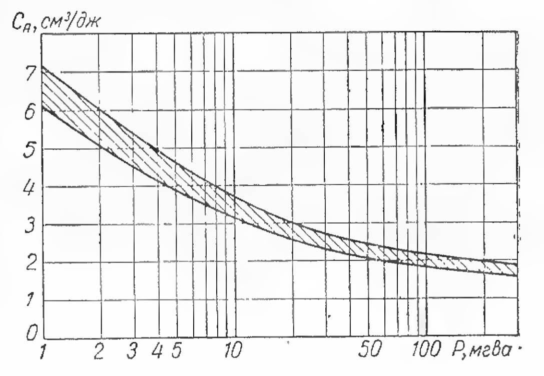



Рис. 274. Постоянная Арнольда для турбогенераторов.

7. Действительная и расчетная длина определяются по § 12-14.

8. Высота паза статора

$$h_п = \tau\lambda_1$$

уточняется после укладки обмотки статора (см. § 12-31 и пример расчета).

## 12-31. ВЫБОР ЧИСЛА ПАЗОВ И ТИПА ОБМОТКИ СТАТОРА

1. Число пазов статора.

В турбогенераторах число пазов на полюс и фазу всегда целое. Шаг паза $t_1$ находится обычно в пределах

$$0{,}03\tau < t_1 < 0{,}05\tau$$

или от 4,5 до 6,5 *см* (последнее в машинах $50 \div 100$ *Мва*).

При выбранной величине шага

$$Z_1 = \frac{\pi D}{t_1}.$$

---

* Условия нагрева могут быть установлены только после расчета потерь возбуждения.

Число пазов

$$Z_1 = 2pmq,$$

если $p = 1$ и $q$ целое, может быть выбрано из чисел $6q$, например $Z = 30, 36, 42, 48, 54, 60$ и т. д.

2. Выбор обмотки статора.

Обмотка статора обычно двухслойная с сокращенным шагом с корзиночными лобовыми частями и двумя проводниками в пазу. Проводник составлен из переплетенных частичных проводников (рис. 37 и 293). Изоляция обмотки непрерывная — микалента на асфальтовом лаке (приложение V).

3. Число витков в фазе.

При выбранной величине индукции в зазоре, полюсном делении и длине машины определяем поток

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l_i B_{\delta_1}$$

и из формулы для э. д. с. холостого хода

$$E_{оф} = \frac{U_{лN}}{\sqrt{3}} = \pi \sqrt{2} f k_{w1} \Phi_1$$

определяем, задаваясь обмоточным коэффициентом $k_w \approx 0{,}92$, число витков

$$w_1 = \frac{E_{оф}}{4{,}44 f_1 k_{w1} \Phi}.$$

Выбираем для $w_1$ ближайшее целое число, удовлетворяющее условию

$$w_1 = pq\frac{s'_п}{a},$$

где $s'_п$ — число активных проводников в пазу: $s'_п = as_п$.

Для двухполюсных турбогенераторов $a = 1$, 2 и реже $a = 4$

Пересчитываем магнитный поток при точном значении $k_w$ (см. п. 4).

$$\Phi_1 = \frac{U_{лN}}{\sqrt{3}\pi\sqrt{2} f w_1 k_{w1}} \ вб$$

и индукцию в воздушном зазоре

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi_1}{\frac{2}{\pi}\tau l_i} \ вб/см^2,$$

которая для турбогенераторов мощностью $P_{2N} \geqslant 25\,000$ *квт* должна быть $B_{\delta 1} = (0{,}75 \div 0{,}85) \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*; для турбогенераторов мощностью $P_{2N} < 25\,000$ *квт* $B_{\delta 1} = (0{,}6 \div 0{,}7) \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*. При значительном отклонении $B_{\delta 1}$ от указанных пределов необходимо изменить $w_1$ (см. пример расчета).

Окончательно величины $B_{\delta 1}$ и $\Phi_1$ принимаются после расчета характеристики намагничивания.

4. Коэффициент обмотки — см. § 12-12 и пример расчета.



5. Сечение меди фазы

$$q_ф = \frac{I}{s},$$

где $s$ — плотность тока (табл. 83).

*Таблица 83*

**Плотности тока для статоров турбогенераторов**

| Охлаждение | $s$ (в *а/см²*) |
|---|---|
| Воздушное | 200—300 |
| Водородное, давление водорода 1,05 *ата* | 250—350 |
| Водородное, с внутренним охлаждением стержней, давление водорода 3—4 *ата* | 600—800 |
| Жидкостное | 800—1200 |

При выборе ширины меди следует сначала выбрать ориентировочно ширину паза

$$b_п = \lambda t_1,$$

где $\lambda \approx 0{,}4 \div 0{,}5$.

Ширина одного частичного проводника

$$b = \frac{1}{n}(b_п - 2\Delta_i),$$

где $2\Delta_i$ — толщина изоляции паза по приложению V;

$n$ — число проводников по ширине паза.

6. После выбора сечения по стандарту и укладки меди в пазу с учетом изоляции по приложению V окончательно устанавливают величины линейной нагрузки

$$A = \frac{Is_п}{t_1} = \frac{Iw}{pqt_1}$$

и плотности тока

$$s = \frac{I}{q_ф}.$$

После этого составляют спецификацию паза и вычерчивают эскиз паза в масштабе.

## 12-32. ВНЕШНИЙ ДИАМЕТР СТАТОРА. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

В турбогенераторах выбор высоты спинки (ярма) имеет весьма большое значение с точки зрения стоимости машины. Наиболее экономичным будет такое ярмо, потери в котором будут во столько раз больше потерь в зубцах, во сколько раз стоимость (вес) его больше стоимости (веса) зубцов (§ 2-7). Это условие выполняется при

$$h_j \approx h_п \frac{\sqrt{\zeta}}{\pi \lambda_1}.$$

Можно так же, как и в явнополюсных машинах, предварительно выбрать высоту ярма статора по допустимой индукции в ярме $B_{j1} = (1{,}3 \div 1{,}4) \cdot 10^{-4}$ *вб/см²*, уточняя внешний диаметр с учетом раскроя.

После этого уточняем расчетную длину и число вентиляционных каналов (см. пример расчета).

При выборе внешнего диаметра следует также учесть возможность использования стандартных размеров конструктивных деталей и т. д.

Воздушный зазор выбирается по заданному о. к. з. или $M_{max}$ в соответствии с XII примера 2.

Практические величины воздушного зазора:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Мощность (в *квт*) | 12 000 | 25 000 | 50 000 | 100 000 |
| Зазор (в *см*) | 1,2 | 2,8 | 4,2 | 5,2 |

## 12-33. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ РОТОРА

1. Обмотанная часть полюсной дуги в роторе из условий синусоидальности кривой поля возбуждения должна быть в пределах

$$\gamma = 0{,}65 \div 0{,}75 = \frac{Z_R}{N_R}.$$

2. Число пазов ротора $Z_R$ выбирается обычно несколько меньшим, чем число пазов статора, так как в противном случае получается чрезмерно ослабленное сечение корня зубца ротора. Необходимо после выбора размеров паза и зубца ротора сразу же проверить их на величину механических напряжений в корне зубца по гл. 8. Число пазов ротора должно быть четным. Обычные числа пазов $Z_R$ и соответствующие числа зубцовых делений $N_R$ даны в табл. 84.

*Таблица 84*

**Числа пазов и соответствующие числа зубцовых делений для турбогенераторов**

| $Z_R$ | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $N_R$ | 16 | 20 | 24 | 30 | 34 | 40 | 44 | 50 |
| | 18 | 22 | 26 | 32 | 36 | 42 | 46 | 52 |
| | — | 24 | 28 | 34 | 38 | 44 | 48 | 54 |
| | — | — | 30 | 36 | 40 | 46 | 50 | 56 |
| | — | — | — | 38 | 42 | 48 | 52 | 58 |
| | — | — | — | — | 44 | 50 | 54 | 60 |
| | — | — | — | — | — | — | 56 | 62 |

3. Пазы ротора турбогенератора представлены на рис. 275 и 295. Конструкция обмотки подробно рассмотрена в [2, 12]. Ширина паза выбирается от 0,35 до 0,4 от шага ($\lambda = 0{,}35 \div 0{,}4$). Глубина паза ротора близка к глубине паза статора и должна быть взята предельной по допустимой толщине корня зубца. Ротор обычно нагружен в тепловом отношении до предела, определяемого нормами, и поэтому необходимо обеспечить возможно большее место для общего сечения меди.



По [51] минимальная толщина корня зубца ротора $b_{zR\,min} = 1{,}35$ *см*, откуда наибольшая высота паза ротора

$$h_{пR} = \frac{\pi D_R - t_{R\,min} N_R}{2\pi},$$

$$t_{R\,min} = b_{zR\,min} + b_{пR},$$

где

$$b_{пR} = (0{,}4 \div 0{,}5)\frac{\pi D_R}{N_R}.$$

Окончательно размеры паза ротора устанавливаются после расчета характеристики намагничивания и определения полной м. д. с. ротора.

## 12-34. ХАРАКТЕРИСТИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

М. д. с. отдельных участков в статоре рассчитываются так же, как в явнополюсной машине. Особенностью расчета турбогенератора является расчет м. д. с. на зубцы и тело ротора. Существует несколько методов этого расчета [2]. Ниже приводится метод Р. А. Лютера (завод «Электросила»).

1. Магнитный поток основной волны

$$\Phi = \frac{E_{1ф}}{\pi\sqrt{2}\, w k_w f}.$$

2. Индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi}\tau l_i}.$$

3. Приведенный коэффициент Картера

$$k_C = k_{C1} k_{C2}\gamma + k_{C1}(1-\gamma),$$

где $k_{C1}$ и $k_{C2}$ — см. § 12-17.

4. М. д. с. на зазор

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} k_C \delta B_\delta = \frac{1}{\mu_0} k_C \frac{B_{\delta 1}}{k_1}\delta,$$

где $k_1$ — по рис. 19.

5. Далее вычисляются сечения для потока в роторе. Согласно рис. 275, эти сечения состоят из сечения в области малых зубцов $S'_z$ и в области большого зуба $S''_z$. Так как сечения малых зубцов проектируются на диаметр, то действительная площадь узких зубцов в сечении

$$S'_{zx} = \frac{Z_R}{2p} l_R b_{xz} K,$$

где $K$ — коэффициент площади

$$K = \frac{1-\cos\frac{\pi}{2}\gamma}{\frac{\pi}{2}\gamma}; \quad \gamma = \frac{Z_R}{N_R}.$$

Площадь сечения большого зуба в том же сечении $x$

$$S''_{zx} = \left[\frac{N_R - Z_R}{2p} t_x - (n_R b_R)\right] l_R,$$

где $t_x$ — шаг зубца в сечении $x$: $t_x = \frac{\pi D_x}{N_R}$;

$n_R$ и $b_R$ — число и ширина вентиляционных каналов в большом зубе.

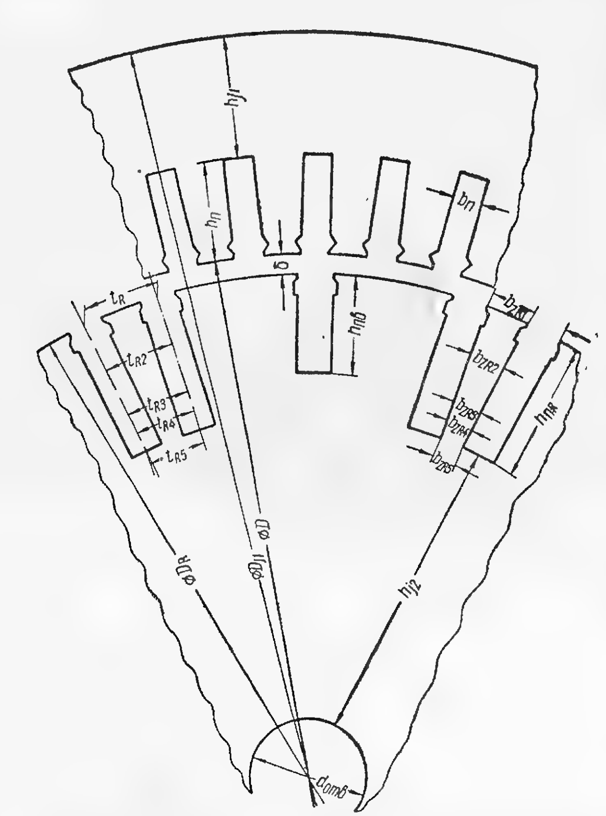



Рис. 275. К расчету магнитной цепи турбогенератора.

6. Полная расчетная площадь в сечении $x$

$$S_{zx} = S'_{zx} + S''_{zx}.$$

7. Отношение площади пазов к площади зубцов ротора (зубцовый коэффициент)

$$k_{zRx} = \frac{[N_R - Z_R(1 - K)]\, l_R t_x}{2pS_{zx}} - 1.$$

8. Условная индукция в зубцах в сечении $x$

$$B_{zRx} = \frac{\Phi\sigma}{S_{zx}},$$



где $\sigma$ — коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1{,}005 + \lambda_{sR} \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{j1}}{\Phi_1 \cdot 10^8},$$

где

$$\lambda_{sR} = \frac{pl_R}{Z_R}\left(\frac{h_{пR}}{2b_{пR}} + 0{,}5\right).$$

Пользуясь известным методом, рассмотренным в гл. 3, по индукции $B_{zRx}$ и отношению $k_{zRx}$ подсчитываем м. д. с. на зубцы в разных сечениях по приложению II для турбороторной стали.

9. М. д. с. на зубцы на длине пути $h_{п2}$

$$F_{zR} = \int_0^{h_{zR}} H_z d_z \approx \frac{h_{п2}(H_{z\,min} + 4H_{z\,ср} + H_{z\,max})}{6}.$$

Для этого составляем таблицу (см. пример расчета турбогенератора).

10. М. д. с. на ярмо ротора (тело ротора) рассчитывается по заданной индукции.

Индукция в ярме ротора

$$B_{jR} = \frac{\Phi\sigma}{l_R(D_R - 2h_{пR})}.$$

11. Для расчета кривой намагничивания составляем таблицу (см. пример расчета), по которой строим характеристику намагничивания машины, и по диаграмме Потье (рис. 270 и 294) определяем для данного $\cos\varphi$ результирующую м. д. с. ротора $F_{fN}$ при номинальном режиме.

Для построения диаграммы Потье определяем $x_s$ и $x_{ad}$ по § 12-24 (при $k_d = 1$).

### 12-35. ОБМОТКА РОТОРА

Ток ротора и число витков при известной м. д. с. $F_f$ определится согласно § 12-22

$$q_f = \rho \frac{2pF_f l_{wf}}{U_f} = h_{Cu} b_{Cu}.$$

Напряжение $U_f$ выбирается по табл. 77.

Длина витка обмотки ротора определяется по приложению VI. Ориентировочно

$$l_{wf} = 2\left(l_R + \frac{0{,}3\pi(D - h_{пR})}{p} + b\frac{Z_R}{p}\right) = 2(l_R + l_{лR}),$$

где $b$ — расстояние между катушками в лобовых частях, равное $1 \div 2{,}5$ *см* в зависимости от мощности машины.

Выбираем ближайшее по стандарту сечение с таким расчетом, чтобы ширина проводника $b_{Cu}$ была меньше ширины паза на величину пазовой и проводниковой изоляции плюс допуск (см. пример расчета). Изоляция обмотки ротора, конструкция и укладка под-

робно рассмотрены в [12], [51]. Таким образом, определяем число витков на полюс

$$w_f = \frac{Z_R}{2p} s_{п2},$$

где $s_{п2}$ — число проводников в пазу, последовательно соединенных. При выбранной высоте меди проводника $h_{Cu}$

$$s_{п2} = \frac{h_{пR} - h_{кR} - h_i}{h_{Cu}},$$

где $h_i$ — суммарная высота изоляции всех витков и прокладок;

$h_{кR}$ — высота клина в пределах 2÷2,5 *см*.

Метод расчета обмотки возбуждения при нестандартном $U_f$ дан в примере расчета. При этом предварительно выбираем плотность тока в обмотке ротора в пределах 300÷400 *а/см*² (при внутреннем водородном охлаждении обмотки 600÷800 *а/см*²).

Ток возбуждения при номинальном режиме

$$i_f = \frac{F_{fN}}{w_f}.$$

Плотность тока в роторе

$$s_f = \frac{i_f}{q_f}.$$

Сопротивление обмотки ротора при 75° С

$$r_f = \rho_{75} \frac{w_f l_{wf}}{q_f}.$$

Далее подсчитываются вес и характеристики использования активных материалов (см. также пример расчета).

## 12-36. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И К. П. Д.

1. Механические потери $p_m = p_T + p_v$ могут быть рассчитаны по гл. 5. Методика расчета механических потерь по их составляющим, учитывающая охлаждающую среду и потери на трение, дана в примере расчета.

2. Потери в железе статора могут быть рассчитаны по гл. 5 или по приведенным ниже формулам завода «Электросила». При этом удельные потери $p_{10}$ при $B = 1$ *вб/м*² берем по приложению I для выбранной марки стали.

Потери в ярме

$$p_j = p_{10}(B_{js})^2 G_j k_j,$$

где $B$ — *вб/м*²; $k_j$ — см. ниже.

Потери в зубцах

$$p_z = p_{10} B_{z\,ср}^2 G_z k_z.$$

Суммарные потери с учетом коэффициента увеличения $k_j = k_z = 1{,}4$ от штамповки

$$p_{Fe} = 1{,}4(p_j + p_z).$$



3. Основные потери в меди статора

$$p_{Cu\,осн} = 3I^2 r_{75}.$$

4. Потери в меди ротора*

$$p_f = i_f^2 r_{f75} + 2\Delta U i_f; \quad \Delta U = (1 \div 2)\ в.$$

5. Сумма основных потерь

$$\sum p_{осн} = p_T + p_v + p_{Fe} + p_{Cu\,осн} + p_f.$$

6. Добавочные потери по гл. 3:

а) в меди статора

$$p_{Cu\,доб} = p_{Cu\,осн}(k_r - 1),$$

где $k_r$ — коэффициент увеличения потерь от вихревых токов (см. гл. 5 и пример расчета);

б) поверхностные потери в роторе от зубцовых полей статора $p_0$ при холостом ходе;

в) то же при нагрузке $p_{zR}$;

г) поверхностные потери в роторе от высших гармонических м. д. с. статора $p_{\nu R}$;

д) пульсационные потери в зубцах статора $p_{п1}$;

е) поверхностные потери в статоре от зубцовых полей ротора $p_{zs}$;

ж) поверхностные потери в статоре от высших гармонических полей ротора $p_{\nu s}$.

7. Сумма добавочных потерь

$$\Sigma p_{доб} = p_0 + p_{zR} + p_{\nu R} + p_{п1} + p_{zs} + \tilde{p}_{\nu s} + p_{Cu\,доб}$$

должна быть не выше значений, указанных в § 12-23.

8. Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_N \cos\varphi_N + \Sigma p}.$$

## 12-37. ПАРАМЕТРЫ И ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

1. Синхронная реактивность

$$x_d = x_{ad} + x_s; \quad x_{ad} = \frac{F_1}{F_\delta}.$$

2. Реактивность рассеяния якоря по § 12-24.

3. Реактивность рассеяния ротора $x_{fs} = \frac{2\pi\mu_0 F_1 l_1}{\Phi} \frac{2p}{Z_R} \lambda_{fs}$.

Проводимость $\lambda_{fs}$ рассчитывается так же, как для статора, т. е. определяется сумма проводимостей паза $\lambda_{п1}$, коронок зубцов $\lambda_{zR}$ и рассеяния лобовых частей $\lambda_{лR}$:

$$\lambda_{fs} = \lambda_{пR} + \lambda_{лR} + \lambda_{zR},$$

* При питании от собственного возбудителя необходимо учесть потери возбудителя, т. е. разделить $p_f$ на к. п. д. возбудителя.

причем так же, как и для статора

$$\lambda_{пR} = \frac{h_1}{3b_{пR}} + \frac{h_к}{b_{пR}},$$

$$\lambda_{лR} = \frac{0{,}16 Z_R D_R}{p^2 l_R},$$

$$\lambda_{zR} = 0{,}2 + \frac{\delta}{2t_{zк}}.$$

4. Реактивность рессеяния успокоительной обмотки по продольной и поперечной оси для цельнокованого ротора

$$x_{kd} \approx x_{kq} = \frac{2\pi\mu_0 F_1 l_R}{\Phi}\,\frac{2p}{Z_R}\left(\frac{\delta + 5}{t_{ZR}}\right).$$

По § 11-20

$$x_{kd} \approx x_{kq} = 0{,}0485 \cdot k_x k_л \sqrt{\frac{A}{500}\,\frac{k_{w1}}{0{,}95}\,\frac{50}{\tau}\left(\frac{0{,}85}{B_{\delta N}}\right)}\sqrt{\frac{\rho_{Fe}}{2 \cdot 10^{-5}}\,\frac{50}{f}},$$

где $k_x \approx 0{,}85$, $k_л = 1 + \frac{2}{\pi}\frac{\tau}{l}$, $B_{\delta N}$ — $вб/м^2$.

При $\rho_{Fe} = 2 \cdot 10^{-5}$ $ом \cdot см$, $B_{\delta N} = 0{,}85$ $вб/м^2$,

$$x_{kd} = 0{,}0412\, k_л \frac{50}{\tau}\sqrt{\frac{A}{500}}\sqrt{s}.$$

При коротком замыкании надо положить $s = 1$; при асинхронном пуске или при асинхронном ходе $s$ — переменно.

5. Сверхпереходная и переходная реактивности, токи короткого замыкания, а также постоянные времени рассчитываются по формулам § 12-24.

Механический, тепловой и вентиляционный расчеты производятся согласно гл. 6, 7 и 8 (см. примеры расчетов).

Основные данные построенных турбогенераторов приведены в табл. 85.

### 12-38. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ОБМОТКИ РОТОРА

Перегрев меди в пазовой части складывается из следующих перепадов температуры: а) по толщине пазовой изоляции $\theta_{iR}$, б) по высоте зубца $\theta_{zR}$, в) между внешней поверхностью бочки ротора и охлаждающим газом $\theta_{\alpha R}$.

*Таблица 85*

**Основные данные построенных турбогенераторов** ($2p = 2$)

| $P_{2N}$ (в *квт*) | $U_л$ (в *в*) | $n_N$ (в об/мин) | $\eta$ (в %) | $\cos\varphi$ | $I_{fN}$ (в *а*) | Статор | | | | | | | | | δ (в *см*) | Ротор | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $D_{j1}'$ (в *см*) | $D$ (в *см*) | $\frac{l\ (в\ см)}{n_s}$ | $Z$ | $b_п \times \frac{h_п}{h}$ | $\frac{s_п}{a}$ | $\frac{a \times b}{a' \times b'}$ (в *мм*) | $y_п$ | $l_{w1}$ | | $l_R$ (в *см*) | $\frac{Z_R}{N_R}$ | $b_{пR} \times \frac{h_{пR}}{h}$ | $\frac{s_{пR}}{a}$ | $\frac{a_{Cu} \times b_{Cu}}{изоляция}$ (в *мм*) | $l_{wf}$ (в *см*) |
| 750 | 3300 | 3000 | 94,90 | 0,80 | — | — | 43,2 | $\frac{68{,}5}{—}$ | 48 | $1{,}37 \times \frac{5{,}3}{—}$ | $\frac{5}{1}$ | — | — | — | 1,12 | — | 20/28 | $2{,}03 \times \frac{8{,}5}{—}$ | $\frac{39}{1}$ | — | — |
| 1500 | 6300 | 3000 | 94,50 | 0,80 | — | — | 60,0 | $\frac{100}{—}$ | 48 | $2 \times \frac{6{,}5}{—}$ | $\frac{6}{1}$ | — | 1—20 | — | 1,25 | — | $\frac{24}{32}$ | $2{,}2 \times \frac{10}{—}$ | $\frac{31}{1}$ | — | — |
| 4000 | 6300 | 3000 | 94,80 | 0,80 | — | — | 70,0 | $\frac{140}{—}$ | 42 | $2{,}6 \times \frac{7{,}5}{—}$ | $\frac{4}{1}$ | — | 1—18 | — | 1,80 | — | $\frac{28}{40}$ | $2{,}2 \times \frac{11{,}5}{—}$ | $\frac{24}{1}$ | — | — |
| 12000 | 6300 | 3000 | 96,30 | 0,80 | — | — | 87,0 | $\frac{175}{—}$ | 48 | $2{,}05 \times \frac{13{,}5}{—}$ | $\frac{2}{1}$ | — | 1—20 | — | 2,50 | — | $\frac{28}{38}$ | $2{,}5 \times \frac{13{,}5}{—}$ | $\frac{29}{1}$ | — | — |
| 25000 | 6300 | 3000 | 97,50 | 0,80 | — | — | 87,0 | $\frac{270}{—}$ | 60 | $1{,}9 \times \frac{16{,}0}{—}$ | $\frac{2}{2}$ | — | 1—26 | — | 2,80 | — | $\frac{32}{42}$ | $2{,}5 \times \frac{14{,}4}{—}$ | $\frac{19}{1}$ | — | — |
| 30000 | 10500 | 3000 | 98,27 | 0,80 | 468 | 180 | 87,0 | $\frac{270}{55}$ | 54 | $2{,}3 \times \frac{17}{14{,}5}$ | $\frac{2}{1}$ | $21 \cdot 2\,\frac{5{,}9 \times 2{,}44}{ПДА}$ | 1—22 | 992 | 2,80 | 280 | $\frac{32}{42}$ | $2{,}5 \times \frac{15}{12{,}2}$ | $\frac{18}{1}$ | $\frac{5{,}7 \times 21{,}5}{ПДЛ}$ | 776 |
| 50000 | 10500 | 3000 | 98,56 | 0,80 | 640 | 224 | 107,5 | $\frac{310}{64}$ | 72 | $2{,}2 \times \frac{18{,}5}{16}$ | $\frac{2}{2}$ | $21 \cdot 2\,\frac{5{,}5 \times 2{,}44}{ПДА}$ | 1—29 | 1154 | 4,25 | 325 | $\frac{36}{46}$ | $3{,}17 \times \frac{15{,}8}{13}$ | $\frac{15}{1}$ | $\frac{7 \times 28}{ПДА}$ | 924,5 |
| 100000 | 13800 | 3000 | 98,18 | 0,85 | 648 | 233 | 109,5 | $\frac{525}{100}$ | 54 | $2{,}65 \times \frac{23}{20{,}5}$ | $\frac{2}{2}$ | $27 \cdot 2\,\frac{6{,}9 \times 2{,}44}{ПДА}$ | 1—23 | 1616 | 4,75 | 540 | $\frac{36}{48}$ | $3{,}17 \times \frac{15{,}6}{12{,}8}$ | $\frac{15}{1}$ | $\frac{7 \times 28}{ПДА}$ | 1341 |
| 150000 | 18000 | 3000 | 98,95 | 0,90 | 668 | 250 | 120,0 | $\frac{625}{112}$ | 54 | $3{,}28 \times \frac{23}{20}$ | $\frac{2}{2}$ | $26 \cdot 2\,\frac{8{,}6 \times 2{,}44}{ПДА}$ | 1,23 | 1900 | 6,25 | 640 | $\frac{40}{52}$ | $3{,}17 \times \frac{15{,}8}{13}$ | $\frac{15}{1}$ | $\frac{7 \times 28}{ПДА}$ | 1580 |

Перепад температуры по толщине изоляции определяется по общему методу

$$\theta_{iR} = \frac{w_i \Delta_{iR}}{k_i} \, ^\circ\text{C},$$

где

$w_i = \frac{2p_{fN}}{Z_R l_{wR} \Pi_R} = \frac{p_{fN}}{Z_R l_{wR} h_{\text{п}R}}$ — удельный тепловой поток через изоляцию паза при равномерном распределении теплового потока через боковую поверхность;

$\Pi_R = 2(h_{\text{п}R} + b_{\text{п}R} - h_{\text{кл}}) \approx 2h_{\text{п}R}$ — периметр паза без клина;

$\Delta_{iR}$ — односторонняя толщина пазовой изоляции; обычно $\Delta_{iR} = 0{,}1$ *см*.

Коэффициент теплопроводности для миканитовой гильзы может быть принят $k_i = 0{,}002$ *вт/° С см*.

Тепловой поток в зубцах будет различным по высоте, так как сечение зубцов ротора переменное. Картина теплового потока в зубцах ротора дана на рис. 276 (без подпазовых каналов).

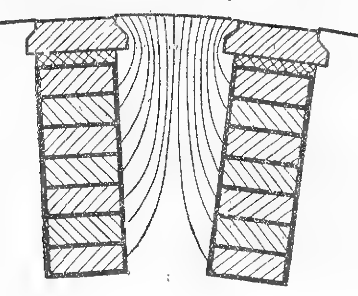


Рис. 276. Тепловой поток в зубцах ротора.

Согласно [102] перепад температуры по высоте зубца

$$\theta_{zR} = 0{,}425 \, \frac{h^2_{\text{п}R}}{b_{zR\,\text{ср}}} \, \frac{w_i}{k_{\text{Fe}}},$$

где $k_{\text{Fe}}$ — по табл. 86.

Перегрев внешней поверхности ротора над охлаждающим газом

$$\theta_{\alpha R} = \frac{w_{\alpha R}}{\alpha_R},$$

где $w_{\alpha R} = \dfrac{2p_{fN} \dfrac{l_R}{l_{wR}} + p_{v2} + p_{\text{доб}\,R}}{\pi k_R D_R l_R}$ — тепловой поток с поверхности ротора;

$k_R$ — коэффициент, учитывающий рифление бочки (при обычном рифлении $k_R = 1{,}8$);

$\alpha_R$ — коэффициент теплоотдачи, определяемый для воздушного охлаждения по рис. 277.

*Таблица 86*

**Коэффициент теплопроводности для турбороторных поковок**

| Марка стали | Мощность турбогенератора (в *квт*) | $k_{\text{Fe}}$ (в *вт/° С. см*) |
|---|---|---|
| Сталь 35 и сталь 40 | до 12 000 | 0,595 |
| ОХН1М | до 30 000 | 0,442 |
| ОХН3М и ОХН4М | 50 000 и выше | 0,395 |



При водородном охлаждении

$$\alpha_{R\text{н}} = 1{,}3\alpha_R \cdot p^{0{,}8},$$

где $p$ — давление водорода, *ата*.

Условный перегрев обмотки ротора (без учета аксиальной теплоотдачи) в пазовой части

$$\theta'_{\text{п}R} = \theta_{iR} + \theta_{zR} + \theta_{\alpha R} + 0{,}5\Delta\theta_a,$$

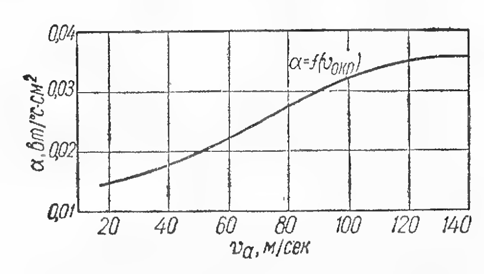



Рис. 277. Коэффициент теплоотдачи с поверхности гладкого ротора в зависимости от окружной скорости.

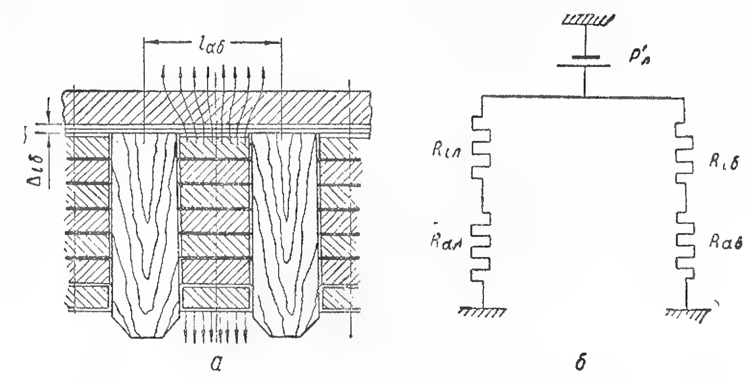



Рис. 278. Закрытый участок лобовой части обмотки ротора турбогенератора:

*а* — распределение теплового потока; *б* — эквивалентная тепловая схема.

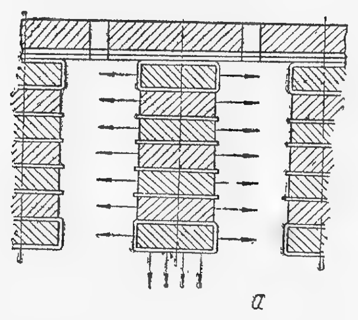
где $\Delta\theta_a = \frac{\Sigma' p}{1{,}1V}$ — подогрев охлаждающего газа в машине, обычно $\Delta\theta_a = (20 \div 25)^\circ$ C.

Лобовая часть обмотки ротора изготавливается в двух различных конструктивных исполнениях: с алюминиевыми седлами и без них. В первом случае витковая изоляция непрерывная, во втором — выполняется в виде прокладок между витками (обычно миканит, см. рис. 295).

Рассмотрим тепловой расчет для обмотки без алюминиевых седел. Лобовую часть обмотки в этом случае можно разделить на два различных в тепловом отношении участка: а) закрытый участок, т. е. участок с изоляционными распорками (рис. 278), б) открытый участок, т. е. тот участок, где нет изоляционных распорок

между проводниками, выходящими из рядом лежащих пазов (рис. 279).

Принятое распределение теплового потока на обоих участках и тепловые схемы замещения этих участков даны на рис. 278 и 279.



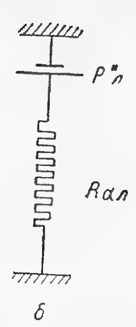



**Рис. 279.** Открытый участок лобовой части обмотки ротора турбогенератора: *а* — распределение теплового потока; *б* — эквивалентная тепловая схема.

Тепловое сопротивление открытого участка

$$R''_{\alpha л} = \frac{1}{\alpha_л S''_л} = \frac{1}{\Lambda''_{\alpha л}},$$

где $S''_л = (2h_{пR} + b_{пR} - 2h_{кл})\, l''_л$ — обдуваемая поверхность открытого участка;

$\alpha_л = 0{,}0022\,(1 + 0{,}25 v_s)$ — для воздушного охлаждения;

$\alpha_{лн} = 1{,}3\, p^{0,8}_{(ата)}\, \alpha_л$ — для водородного охлаждения;

$v_s$ — скорость газа в лобовой части; ориентировочно можно принять $v_s = (10-15)$ *м/сек*.

Тепловые сопротивления закрытого участка: подбандажная изоляция

$$R_{iб} = \frac{\Delta_{iб}}{k_{iб} S_{iб}},$$

где $S_{iб} = b_{Cu} l'_л$; $k_{iб} = 0{,}0016$ *вт/см °С*;

«сход» от бандажа $R_{\alpha б} = \dfrac{1}{\alpha_б S_{\alpha б}}$,

$S_{\alpha б} = l_{\alpha б} l'_л$ — по рис. 278, *а*; $\alpha_б \approx \alpha_R$

изоляция нижних витков ротора

$$R_{iл} = \frac{\Delta_{iл}}{k_{iл} S'_{iл}},$$

где

$$S'_{iл} = b_{Cu\,R}\, l'_л;\quad l'_л = l_{лR} - l''_л$$

«сход» от нижних витков

$$R'_{\alpha л} = \frac{1}{\alpha_л S''_{iл}}.$$

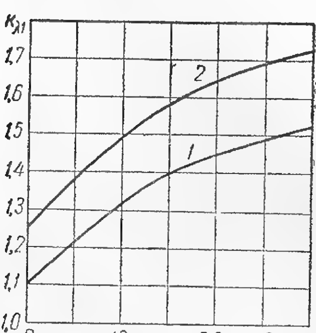



Рис. 280. Поправочный коэффициент, учитывающий увеличение теплопроводности изоляции в атмосфере водорода:
*1* — для статора, *2* — для ротора.



В атмосфере водорода увеличение коэффициента теплопроводности $k_{iл}$ учитывается коэффициентом $k_{\lambda 1}$ по рис. 280

$$k_{iл} = k_i k_{\lambda 1}.$$

Эквивалентная тепловая проводимость закрытого участка

$$\Lambda'_л = \frac{1}{R_{iб} + R_{\alpha б}} + \frac{1}{R_{iл} + R'_{\alpha л}}.$$

При большом различии тепловых сопротивлений закрытого и открытого участков необходимо учитывать тепловой поток вдоль витков обмотки от закрытого участка к открытому (гл. 6).

Упрощенно средний перегрев меди лобовой части обмотки определяем как сумму потерь, разделенную на сумму проводимостей,

$$\theta_{л.\,ср} = \frac{2 p_{fN}\, l_{лR}}{Z_R\, l_{wR}} \cdot \frac{1}{\Lambda'_л + \Lambda''_{\alpha л}}.$$

Максимальная температура закрытого участка

$$\theta_{л\,max} \approx \theta_{л.ср} + \frac{\tilde{p}'_{0x}}{8\, k_{Cu}}\, l_x^2,$$

где $p'_{0x} = \dfrac{s_f^2 p}{1 + \Lambda'_л / \Lambda_{Cu}}$ — тепловой поток вдоль витка;

$\Lambda_{Cu} = \dfrac{k_{Cu} S_{Cu}}{l_x}$ — тепловая проводимость вдоль витка;

$k_{Cu}$ — теплопроводность меди, $k_{Cu} = 3{,}75$ *вт/° С см*;

$S_{Cu}$ — сечение меди закрытого участка на один паз;

$l_x$ — длина закрытого участка, $l_x = l'_л$.

Средний перегрев обмотки ротора

$$\theta_{Cu\,f} = \frac{\theta'_{пR} l_R + \theta_{л.ср} l_{лR}}{l_R + l_{лR}}.$$

Расчет перегрева лобовой части обмотки производится по «среднему» витку обмотки (см. пример расчета).

## 12-39. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО (ВНУТРЕННЕГО) ОХЛАЖДЕНИЯ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРА

При непосредственном охлаждении охлаждающий агент (вода, водород при повышенном давлении) прогоняется через специальные каналы в меди обмоток.

В о д я н о е о х л а ж д е н и е с т а т о р а и р о т о р а. Наиболее эффективным является водяное охлаждение обмотки статора. В этом случае используется конденсат от паровой турбины, пропускаемый через химический фильтр.

Конструктивно стержень обмотки выполняется либо из проводников специального (коробчатого) профиля с внутренним каналом (рис. 259, *б*), либо из обычных проводников прямоугольного сечения, между которыми помещаются прямоугольные трубки из специальной немагнитной стали (рис. 259, *а*). Трубки для прохождения

охлаждающей воды изолируются от проводников обмотки слоем стеклоленты. Головки нескольких стержней обмотки объединяются распределительными коллекторами из непроводящего материала (резина, пластмасса), по которым в обмотку подается охлаждающая вода.

Средняя температура меди обмотки $\theta^{\circ}_{\text{Cu ср}}$ в первом случае складывается из средней температуры охлаждающей воды $\theta^{\circ}_{\text{в.ср}}$ и перепада температуры между поверхностью канала и водой $\theta_{\alpha}$. Во втором случае, кроме того, добавляется внутренний перепад температуры в изоляции проводников и охлаждающих трубок $\theta_i$.

При расчете средней температуры меди обмотки считаем, что все выделяющееся в обмотке тепло отводится охлаждающей водой, т. е. пренебрегаем отводом тепла через пазовую изоляцию.

Средний перегрев воды

$$\Delta\theta_{\text{в}} = \frac{p_{\text{Cu}}}{V_{\text{в}} c_v} \, ^\circ\text{C},$$

где $p_{\text{Cu}}$ — потери в меди обмотки статора с учетом добавочных потерь, *квт*;

$V_{\text{в}}$ — расход воды, *л/сек*;

$c_v$ — объемная теплоемкость воды, $\frac{кдж}{л^\circ \text{C}}$; при 20° С $c_v = 4{,}18 \frac{кдж}{л^\circ \text{C}}$.

Обычно $\Delta\theta_{\text{в}} < 10^\circ$ С.

Добавочные потери в меди для обмотки из полых проводников подсчитываются по формуле (метод Р. А. Лютера, завод «Электросила»)

$$p_{\text{Cu доб}} = \left(1 - \frac{a'b'}{ab}\right)\left(1 - \frac{a'^3 b'}{a^3 b}\right) 0{,}0107\,(m_1 s_{\text{п}})^2 \left(\frac{n_1 b}{b_{\text{п}}}\right)^2 a^4 p_{\text{Cu осн}},$$

где $a$, $b$ — высота и ширина элементарного проводника, *см*;

$a'$, $b'$ — высота и ширина канала охлаждения, *см*;

$m_1$ — число элементарных проводников по высоте стержня;

$n_1$ — число элементарных проводников по ширине паза;

$s_{\text{п}}$ — число стержней в пазу.

Расход охлаждающей воды

$$V_{\text{в}} = 0{,}1 a'b' m_1 s_{\text{п}} n_1 Z_1 v = Q_{\text{к}} v \ \ л/сек,$$

где $Q_{\text{к}} = a'b' m_1 s_{\text{п}} n_1 Z_1$ — сечение всех каналов статора, *см²*;

$v$ — скорость движения воды, *м/сек*; принимается при водяном охлаждении не более (1÷2) *м/сек*.

Объемная теплоемкость воды $c_v$ изменяется в зависимости от начальной температуры воды $\theta^{\circ}_{\text{во}}$ : $\theta^{\circ}_{\text{во}} = 0$ $c_v = 4{,}23 \frac{кдж}{л^\circ \text{C}}$;

$$\theta^{\circ}_{\text{во}} = 20^\circ \text{C}\ c_v = 4{,}18 \frac{кдж}{л^\circ \text{C}};\ \ \theta^{\circ}_{\text{во}} = 60^\circ \text{C}\ c_v = 4{,}11 \frac{кдж}{л^\circ \text{C}};$$

$$\theta^{\circ}_{\text{во}} = 90^\circ \text{C}\ c_v = 4{,}04 \frac{кдж}{л^\circ \text{C}}.$$

Начальная температура охлаждающей воды принимается равной 50—60° С.



Удельный тепловой поток в канале охлаждения

$$w_{\text{к}} = \frac{2 p_{\text{Cu}}}{\Pi_{\text{к}} l_w Z_1 m_1 s_{\text{п}} n_1} \ \ вт/см^2,$$

где $\Pi_{\text{к}}$ — периметр канала, *см*.

Перепад температуры между поверхностью канала и охлаждающей водой

$$\theta_{\alpha} = \frac{w_{\text{к}}}{\alpha_{\text{в}}},$$

где $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи воды, *вт/° С · см²*.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{в}}$ зависит от скорости движения воды по каналам, физических свойств воды (теплопроводность, кинематическая вязкость), температуры и эквивалентного диаметра канала $d_{\text{экв}}$ (§ 6-3).

По данным опыта коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{в}}$ можно рассчитывать по формуле

$$\alpha_{\text{в}} = 91{,}8 \cdot 10^{-4} v^{0,8} (39{,}5 + \theta_{\text{в}}^{\circ 0,85}) \left(\frac{1}{d_{\text{экв}}}\right)^{0,2} \ вт/^\circ \text{C} \cdot см^2,$$

где $v$ — скорость движения воды, *м/сек*;

$\theta_{\text{в}}$ — температура охлаждающей воды, °С;

$d_{\text{экв}}$ — эквивалентный гидравлический диаметр канала

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 q'_{\text{к}}}{\Pi_{\text{к}}} = 2 \frac{a'b'}{a + b} \ см;$$

$q'_{\text{к}}$ — сечение канала, *см²*.

Средняя температура меди обмотки статора

$$\theta^{\circ}_{\text{Cu ср}} = \theta^{\circ}_{\text{во}} + \Delta\theta_{\text{в}} + \theta_{\alpha}.$$

При выполнении стержня обмотки по рис. 259, *а* удельный тепловой поток в трубках

$$w_{\text{тр}} = \frac{p_{\text{Cu}}}{Z_1 l_w (b_{\text{тр}} + m_{\text{тр}} h_{\text{тр}}) s_{\text{п}}} \ вт/см^2,$$

где $b_{\text{тр}}$, $h_{\text{тр}}$ — ширина и высота трубки, *см*;

$m_{\text{тр}}$ — число трубок в стержне.

Перепад температуры по толщине изоляции проводников и трубок

$$\theta_i = w_{\text{тр}} \left(\frac{\Delta_{i\,\text{пр}}}{k_{i\,\text{пр}}} + \frac{\Delta_{i\,\text{тр}}}{k_{i\,\text{тр}}}\right),$$

где $\Delta_{i\,\text{пр}}$, $\Delta_{i\,\text{тр}}$ — односторонняя толщина изоляции проводников и трубок;

$k_{i\,\text{пр}}$, $k_{i\,\text{тр}}$ — коэффициент теплопроводности изоляции проводников и трубок, *вт/° С · см*;

$k_i = 0{,}002$ *вт/° С · см* — для проводников марки ПСД;

$k_i = 0{,}0016$ *вт/° С · см* — для изоляции трубок стеклолентой.

В о д о р о д н о е  о х л а ж д е н и е  с т а т о р а  и  р о т о р а. Конструктивно обмотка статора при водородном охлаждении может

быть выполнена так же, как и при водяном охлаждении (рис. 259). Так как объемная теплоемкость водорода значительно меньше теплоемкости воды, то расход (*л/сек*) водорода, а следовательно, и скорости движения по охлаждающим каналам будут значительно выше ($v = 20 \div 40 \frac{м}{сек}$). При расчете изменением теплоемкости с увеличением температуры пренебрегаем, так как это изменение для водорода очень незначительно (при увеличении температуры газа от 0 до 100° C объемная теплоемкость увеличивается примерно на 3%).

Средний перегрев водорода в каналах

$$\Delta\theta_н = \frac{p_{Cu}}{1{,}1pV_н},$$

где $p_{Cu}$ — потери в меди, *квт*;

$V_н$ — расход водорода через каналы, *м³/сек*;

$p$ — давление водорода в каналах, *ата*.

Коэффициент теплоотдачи в каналы по общей формуле (для двухатомных газов)

$$\alpha = 0{,}018\,\mathrm{Re}^{0,8}\frac{k_н}{d_{экв}},$$

где $\mathrm{Re} = \frac{vd_{экв}}{\nu_н}$ — критерий (число) Рейнольдса;

$\nu_н$ — кинематическая вязкость водорода;

$k_н$ — коэффициент теплопроводности водорода.

Подставляя значения Re, $\nu_н$ и $k_н$ получим

$$\alpha_н = 0{,}00132v^{0,8}\left(\frac{1}{d_{экв}}\right)^{0,2}p^{0,8}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{0,56}\ вт/°\,C\cdot см^2,$$

где $v$ — *м/сек*;

$d_{экв}$ — *см*;

$T_0 = 273°K$ (0° C);

$T$ — абсолютная температура газа по шкале Кельвина.

Перепад температуры между поверхностью канала и водородом

$$\theta_{\alpha н} = \frac{w_к}{\alpha_н},$$

где $w_к$ — удельный тепловой поток.

Средняя температура меди

$$\theta^{\circ}_{Cu\,ср} = \theta^{\circ}_{н0} + \Delta\theta_н + \theta_{\alpha н}.$$

Непосредственное водородное охлаждение обмотки ротора выполняется конструктивно либо в виде самовентиляции с забором и выбросом водорода в воздушный зазор турбогенератора (завод «Электросила»), либо в виде принудительной вентиляции с помощью специальных центробежных компрессоров (завод ХЭТЗ). В первом случае обмотка ротора изготовляется из меди обычного прямоугольного профиля с последующим фрезерованием наклонных вентиляционных каналов по боковым поверхностям катушек обмотки ротора (рис. 259, *г*). Во втором случае обмотка ротора изготовляется из меди специального профиля с внутренними вентиляционными каналами, в которые водород подается компрессорами со стороны лобовых частей обмотки.

Скорость движения водорода по вентиляционным каналам при самовентиляции зависит от конструкции заборников. В среднем по опытным данным средняя скорость водорода в каналах может быть принята равной $0{,}3v_a$, где $v_a$ — окружная скорость ротора.

При принудительной вентиляции средняя скорость водорода в каналах зависит от гидравлического сопротивления каналов и напора, развиваемого компрессорами, и рассчитывается в вентиляционном расчете. Необходимое количество водорода для охлаждения определяется по среднему допустимому перегреву водорода в каналах $\Delta\theta_{Н\,доп}$

$$V_Н = \frac{p_{fN}}{1{,}1\,p\,\Delta\theta_{Н\,доп}}\ м^3/сек.$$

Допустимый перегрев водорода в каналах может быть принят 25—30° C. При расчете можно считать, что все тепло выделяется в вентиляционные каналы.

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

### Пример 1

### Расчет гидрогенератора

#### I. Проектное задание (§ 12-8)

1. Наименование машины — гидрогенератор.
2. Номинальная мощность $P_N = 90\,000$ *ква*; $P_{2N} = 72\,000$ *квт* (активная).
3. Линейное напряжение $U_{лN}$ 13 800 *в*, соединение фаз—звезда.
4. Частота $f_N = 50$ *гц*.
5. Коэффициент мощности $\cos\varphi_N = 0{,}8$ (отстающий).
6. Скорость вращения $n_N = 83{,}3$ об/мин.
7. Гарантированный к. п. д. $\eta_N = 97{,}5\%$.
8. О. к. з. $= \frac{1}{x_d} = 1{,}25$, переходная реактивность $x'_d$ не выше 0,3 д. ед.
9. Маховой момент $CD^2 = 39\,000$ *тм²*.
10. Угонная скорость $n_{уг} = 2n_N = 166{,}6$ об/мин.
11. Тип первичного двигателя — радиально-осевая гидротурбина (Фрэнсиса).
12. Конструктивный тип — подвесной.
13. Система вентиляции — замкнутая.

Машина должна иметь полную демпферную клетку на роторе. Система возбуждения — от машинного возбудителя с автоматическим регулированием и компаундированием.

Допуски на заданные значения к. п. д., о. к. з., $x'_d$ и $GD^2$:

$$\Delta\eta = \pm\frac{100-\eta}{10}\,\% = \pm\frac{100-97{,}5}{10} = \pm\,0{,}25\%;\ \Delta\ (о.\ к.\ з.)\% = \pm\,0{,}1;$$

$$\frac{\Delta x'_d}{x'_d} = 0{,}1;\quad \frac{\Delta GD^2}{GD^2} = 0{,}2.$$

В остальном — полное соответствие нормам.

Рассчитать вариант с аксиальной вентиляцией.

II. Дополнительные расчеты к проектному заданию.

1. Фазный ток

$$I_N = \frac{P_N \cdot 10^3}{\sqrt{3}\, U_л} = \frac{90\,000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13\,800} = 3\,765\ a.$$

2. Фазное напряжение

$$U_ф = \frac{U_{лN}}{\sqrt{3}} = 7\,970\ в.$$

Число полюсов

$$2p = 2\frac{60 f_N}{n_N} = 2 \cdot \frac{50 \cdot 60}{83{,}3} = 72.$$

4. Инерционная постоянная

$$T_i = \frac{1}{4}\frac{GD^2 \omega_N^2}{P_N} = \frac{1}{4} \cdot \frac{39 \cdot 10^6}{90 \cdot 10^6}\left(\frac{2\pi\, 83{,}3}{60}\right)^2 = 8{,}23\ сек.$$

*Оценка заданного к. п. д. и отдельных потерь* (§ 12-8)

5. Сумма потерь

$$\Sigma p = P_{2N}\frac{1-\eta_N}{\eta_N} = 72\,000 \cdot \frac{1-0{,}975}{0{,}975} = 1845\ квт.$$

6. Механические потери (на трение и вентиляцию) в % от $P_{2N}$

$$p_m \cong k_m \sqrt[3]{\frac{n}{100}} \cdot \sqrt[4]{\frac{1000}{P_{2N}}}\ \% = 1{,}5 \cdot \sqrt[3]{\frac{83{,}3}{100}} \cdot \sqrt[4]{\frac{1000}{72\,000}} = 0{,}5,\ \text{или}\ p_m = 360\ квт,$$

где $k_m = 1{,}5$ для подвесных гидрогенераторов.

7. Добавочные потери (§ 12-23)

$p_{доб} = (0{,}25 \div 0{,}4)\ \%$ от $P_{2N}$; $p_{доб} = 0{,}003\ P_{2N} = 0{,}003 \times 72\,000 = 216\ квт.$

8. Сумма основных потерь в железе и в меди

$$\Sigma p' = p_{Cu} + p_f + p_{Fe} = \Sigma p - (p_m + p_{доб}) = 1845 - (360 + 216) = 1296\ квт.$$

9. Отношение потерь в меди ротора и статора

$$k_{21} = \frac{p_f}{p_{Cu}} \approx 0{,}7 \cdot \sqrt{\frac{1{,}21}{x_d^2} + 1 + \frac{2{,}2 \sin\varphi}{x_d}} = 0{,}7 \cdot \sqrt{\frac{1{,}21}{0{,}8^2} + 1 + \frac{2{,}2 \cdot 0{,}6}{0{,}8}} = 1{,}48.$$

10. Отношение основных потерь в меди и стали

$$\xi = \frac{p_{Cu}}{p_{Fe}} \approx 0{,}7,$$

откуда

$$p_{Cu} = \frac{\Sigma p'}{1 + k_{21} + \frac{1}{\xi}} = \frac{1296}{1 + 1{,}48 + \frac{1}{0{,}7}} = 332\ квт;$$

$$p_{Fe} = \frac{p_{Cu}}{\xi} = \frac{332}{0{,}7} = 473\ квт;$$

$$p_f = p_{Cu} k_{21} = 332 \cdot 1{,}48 = 492\ квт.$$



Сумма потерь и к. п. д. должны быть в пределах

$$\Sigma p\% = 0{,}55\left(\frac{2p}{P_N}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot 100 + p_m\,\% + p_{доб}\,\% = 0{,}55\left(\frac{72}{90\,000 \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{4}} \times 100 + 0{,}5 + 0{,}3 = 1{,}65 + 0{,}5 + 0{,}3 = 2{,}45\%\ \text{и}$$

$$\eta = 100 - \frac{\Sigma p\% \cdot 100}{100 + \Sigma p\%} = 97{,}6\%.$$

III. Ориентировочный выбор основных размеров (§ 12-9)

*Метод универсальной машинной постоянной.*

Универсальная машинная постоянная

$$C_s = (k_\omega k_\varphi s B_z)^{-\frac{1}{4}} = (3{,}5 - 4{,}5)\ см.\ дж.^{-\frac{1}{4}}.$$

Принимаем (табл. 79) для $U_л = 13\,800\ в$

$$C_s = 4{,}25\ см \cdot дж.^{-\frac{1}{4}}$$

2. Отношение $\beta = \frac{\tau}{l_i} = 0{,}27$ выбираем по § 2-5.

Выбираем ориентировочно $\lambda_1 = 0{,}3$ по рис. 261.

3. Полюсное деление

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P_N \beta}{2p\lambda_1 \sqrt{2} f_N}} = 4{,}25 \cdot \sqrt[4]{\frac{90\,000 \cdot 10^3 \cdot 0{,}27}{72 \cdot 0{,}3 \sqrt{2} \cdot 50}} = 47{,}75\ см.$$

4. Диаметр расточки

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{72 \cdot 47{,}75}{\pi} = 1092\ см.$$

5. Расчетная длина машины

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{47{,}75}{0{,}27} = 177\ см.$$

*Метод машинной постоянной Арнольда*

6. Машинная постоянная

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_\omega B_\delta A} = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 530} = 3{,}27\ см^3/дж,$$

где $B_\delta = 0{,}9 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2$ и $A = 530\ а/см$ выбраны по рис. 263 и 264, а обмоточный коэффициент принят ориентировочно $k_\omega = 0{,}92$.

7. Приняв, как и раньше $\beta = 0{,}27$, получаем диаметр расточки

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_N 2p\beta}{\pi n} C_A} = \sqrt[3]{\frac{90\,000 \cdot 10^3 \cdot 72 \cdot 0{,}27}{\pi \cdot 1{,}388} \cdot 3{,}27} = 1106\ см.$$

8. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 1106}{72} = 48{,}3\ см.$$

9. Расчетная длина

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{48{,}3}{0{,}27} = 179\ см.$$

10. Определение $\tau_{max}$ из условий угонной скорости $v_{уг} \leqslant 130$ м/сек для шихтованного ротора, то есть при $k_{уг} = 2$ $\tau_{max} = 65$ см.

Принимаем $\tau = 48$ см, тогда $l_i = \frac{48}{0,27} = 180$ см и

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{72 \cdot 48}{3,14} = 1100 \text{ см}.$$

11. Ориентировочно проверяем возможность получения заданного $GD^2$

$$D^4 l > \frac{GD^2}{K}; \; 11^4 \cdot 1,8 = 26\,400 > \frac{39\,000}{2} = 19\,500,$$

где $D$ и $l$ — диаметр расточки и полная активная длина;

$$K = 2 \text{ для } D > 5 \text{ м (§ 12-8)}.$$

## IV. Внешний диаметр и размеры паза статора (§ 12-9, § 12-10)

1. Определяем ориентировочно внешний диаметр статора

$$D_{i1} = D + (1 \div 1,2)\,\tau = 1100 + (48 \div 57,6) = (1148 \div 1157,6) \text{ см}.$$

Окончательно внешний диаметр определяется после раскроя и сегментировки.

2. При выбранной линейной нагрузке $A = 530$ а/см и плотности тока $s = 250$ а/см² высота паза статора

$$h_п = \frac{A}{s\varphi_{Cu}\lambda} = \frac{530}{250 \cdot 0,3 \cdot 0,4} = 17,6 \text{ см},$$

где $\varphi_{Cu} = 0,3$ — коэффициент заполнения паза медью;

$\lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0,4$ — выбрано в соответствии с § 1-6.

3. Из экономических и эксплуатационно-технических условий согласно принятой величине $\lambda_1$

$$h_п = \tau\lambda_1 = 48 \cdot 0,3 = 14,4 \text{ см}.$$

Ориентировочно принимаем $h_п = 16$ см.

Окончательная высота определяется после укладки обмотки.

4. Из условия допустимого перепада температуры в изоляции ширина паза

$$b_п = \frac{\theta_i}{\alpha_w} = \frac{25 \div 30}{9,66} = (2,58 \div 3,11) \text{ см},$$

где $\theta_i = (25 \div 30)$ °C — допустимый перепад температуры и изоляции;

$$\alpha_w = \frac{s^2 \rho_0 \varphi_{Cu} \Delta_i}{2k_i} = \frac{250^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,3 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,0017} = 9,66 \text{ °C/см}.$$

Односторонняя толщина изоляции при $U_{лN} = 13\,800$ в $\Delta_i = 0,6$ см (приложение V). Для изоляции класса $B$ теплопроводность $k_i = 0,0017$ вт/°С · см.

5. По данным практики, для крупных гидрогенераторов отношение

$$\lambda_2 = \frac{h_п}{b_п} = 5 \div 6.$$

Принимаем $\lambda_2 = 5,5$, тогда $b_п = \frac{16}{5,5} = 2,9$ см.

Окончательная ширина паза определяется после укладки обмотки.



## V. Число витков в фазе, сечение меди и число пазов статора (§ 12-11)

1. Число витков (ориентировочно)

$$w = \frac{E_ф}{\pi\sqrt{2}\,k_w f \Phi_1} = \frac{7970}{\pi\sqrt{2} \cdot 0,92 \cdot 50 \cdot 0,495} = 79,$$

где $E_ф = U_ф = 7970$ в; $\Phi_1 = \frac{2}{\pi}\tau l_i B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 48 \cdot 180 \cdot 0,9 \cdot 10^{-4} = 0,495$ вб.

Величина $w$ уточняется после выбора $Z$ и $q$.

2. Сечение фазного провода

$$q_ф = \frac{I_N}{s} = \frac{3765}{250} = 15,06 \text{ см}^2.$$

Целесообразно выбрать стержневую обмотку.

3. Варианты чисел параллельных ветвей

$$a = \frac{I_N}{3000 \div 1500 \div 1000} \approx 1;\ 2;\ 3.$$

Выбираем $a = 2$.

4. Орентировочно выбираем число пазов по допустимому шагу паза $t_1$

$$Z_1 = \frac{\pi D}{t_1} = \frac{\pi \cdot 1100}{7} = 494.$$

Для крупных машин шаг

$$t_1 = \frac{b_п}{\lambda} = (5 \div 7,5) \text{ см}.$$

Полученное число $Z_1$ не удовлетворяет требованию разложения на простые множители.

Пробы подбора ближайших чисел показывают, что следует выбрать

$$Z_1 = 486 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3.$$

5. Уточненный выбор числа пазов по выполнимости обмотки. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{m\,2p} = \frac{486}{3 \cdot 72} = 2 + \frac{1}{4}.$$

Условие симметрии

$$\frac{Z_1}{3t} = \frac{486}{3 \cdot 18} = 9 \text{ — целое число}$$

($t = 18$ — общий наибольший делитель между числами $Z_1$ и $p$).

Условия дробности $q$

$$q \geqslant 1\frac{1}{2};$$

$$3q = K \pm \frac{d-2}{2d};\ 3 \cdot 2\frac{1}{4} = 6 + \frac{3}{4} = 7 - \frac{4-2}{8} = 7 - \frac{1}{4};$$

$$\frac{2p}{ad} = \frac{72}{(1 \div 2 \div 3) \cdot 4} = 18 \div 9 \div 6 \text{ — целое число}.$$

По [45] желаемая дробность из условия минимума перемычек в волновой обмотке

$$q = b + \frac{c}{d};\ c = \frac{nd \pm 1}{3} = \frac{4n \pm 1}{3} = \text{целое число при } n = 1;\ c = 1.$$

Окончательно получаем

$$Z_1 = 2pmq = 486.$$

6. Шаг

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 1100}{486} = \mathbf{7,11} \textbf{ см}.$$

7. Уточняем число витков на фазу, выбирая число проводов в пазу $s'_п = 2$, $s_п = \frac{s'_п}{a} = 1$

$$w = \frac{s'_п}{a} pq = \frac{2}{2} \cdot \frac{36 \cdot 9}{4} = 81.$$

8. Число сегментов по окружности статора получаем из условия наилучшего использования площади нормальных листов электротехнической стали

$$n_{сегм} = \frac{\pi D_{j1}}{37 \div 74 \div 85 \div 99} = 98 \div 49 \div 43 \div 37.$$

Для рационального раскроя стандартных листов и с точки зрения разъема статора на 6 частей подходящим является $n_{сегм} = 54$ сегмента по 9 пазов.

9. Длина большой и малой хорд

$$l_{c1} = D_{j1} \sin \frac{360°}{2n_{сегм}} = 1160 \sin \frac{360°}{2 \cdot 54} = 1160 \cdot 0{,}0583 = 67{,}63 \ см;$$

$$l'_{c1} = D \sin \frac{360°}{2n_{сегм}} = 1100 \cdot \sin \frac{360°}{2 \cdot 54} = 64{,}13 \ см.$$

## VI. Схема обмотки (§ 12-12)

1. Составляем схему обмотки путем построения звезды или таблицы векторов и определяем числовой ряд обмотки.

Общее число векторов, несовпадающих по фазе,

$$Z_0 = \frac{Z_1}{t} = \frac{486}{18} = 27,$$

где $t$ — общий наибольший делитель $Z_1$ и $p$.

Угол между векторами двух соседних пазов

$$\beta° = \frac{360° \cdot p_0}{Z_0} = \frac{360 \cdot 2}{27} = 26° 40',$$

где

$$p_0 = \frac{p}{t} = \frac{36}{18} = 2.$$

Угол между соседними лучами

$$\alpha^0 = \frac{360°}{Z_0} = \frac{360°}{27} = 13° 20'.$$

Так как число пазов на полюс и фазу $q = 2 + \frac{1}{4}$, то в числовом ряду будет одна большая и три малых группы. Числовой ряд: 2, 2, 2, 3.

2. Результирующий шаг обмотки

$$y_к = y_1 + y_2 = \frac{Z_1 \pm m_x}{p};$$

по 1-му варианту

$$y_к = \frac{Z_1 + m_x}{p} = \frac{468 + 18}{36} = 14;$$

по 2-му варианту

$$y_к = \frac{Z_1 - m_x}{p} = \frac{486 - 18}{36} = 13,$$

где $m_x = 18$ — минимальное число ходов обмотки, делающее $y_к$ целым.



Шаг по пазам: по 1-му варианту 1 — 9 — 15, т. е. $y_1 = 8$, $y_2 = 6$; по 2-му варианту 1 — 7 — 14, т. е. $y_1 = 6$, $y_2 = 7$.

Полюсное деление в пазах

$$\tau_п = mq = 3 \cdot 2\frac{1}{4} = 6{,}75.$$

Относительный шаг обмотки:

по 1-му варианту

$$y = \frac{y_1}{\tau_п} = \frac{8}{6{,}75} = 1{,}185, \ (y = 2 - 1{,}185 = 0{,}815);$$

по 2-му варианту

$$y = \frac{6}{6{,}75} = 0{,}89.$$

3. Коэффициент обмотки

$$k_{w1} = k_у k_р$$

по первому варианту

$$k_у = \sin(90° \cdot y) = \sin(90° \cdot 0{,}815) = 0{,}955;$$

$$k_р = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{N \cdot \sin \frac{\pi}{2mN}} = 0{,}955;$$

$$k_w = k_у k_р = 0{,}915;$$

по второму варианту

$$k_у = \sin(90° \cdot 0{,}89) = 0{,}982; \ k_р = 0{,}955;$$

$$k_{w1} = k_у k_р = 0{,}94.$$

В 1-м варианте более благоприятный относительный шаг, но лобовые части длиннее (перекрещенная обмотка). Принимаем 1-й вариант.

Рис. 281. Паз статора.

## VII. Размеры меди, уточнение размеров паза и зубца, плотности тока, линейной нагрузки и индукции в зазоре (§ 12-13)

1. Сечение меди одной параллельной ветви

$$q'_ф = \frac{I_N}{as} = \frac{3765}{2 \cdot 250} = 7{,}53 \ см^2 = 753 \ мм^2.$$

2. Число элементарных проводников в одном стержне

$$c \approx \frac{q'_ф}{16} = \frac{753}{16} = 47.$$

(Выбираем $c = 40$; сечение одного элементарного проводника из условий минимума потерь от вихревых токов выбираем около 16 $мм^2$)

3. Ориентировочная ширина секции без пазовой изоляции

$$b_c = b_п - \Delta_п - 0{,}06 = 2{,}9 - 1{,}2 - 0{,}06 = 1{,}64 \ см,$$

где $\Delta_п = 1{,}2$ см — двусторонняя пазовая изоляция (приложение VI); 0,06 см — добавка на неточность при сборке.

Если по ширине паза расположить два элементарных проводника, то **ширина** одного элементарного проводника

$$b = 0{,}82 \ см.$$

4. Выбираем по сортаменту медь марки ПДА сечением $q_{пр} = 19 \ мм^2$ и размерами $\frac{2{,}63 \times 7{,}4}{2{,}93 \times 7{,}7}$ *мм*, тогда

$$q'_ф = cq_{пр} = 40 \cdot 19 = 760 \ мм^2;$$

$$q_ф = acq_{пр} = 1520 \ мм^2 = 15{,}2 \ см^2.$$

5. Спецификация паза (рис. 281):

| Наименование | Размеры по ширине паза (в *мм*) | Размеры по высоте паза (в *мм*) |
|---|---|---|
| 1. Проводники марки ПДА 2,63×7,4 . . | 7,7×2 = 15,4 | 2,93×21 = 61,53 |
| 2. Изоляция крайних проводников стержня: микалента ЛМС-11 0,2×20 *мм* (ГОСТ 7019—54) один слой впритык . | | 0,2×2×2 = 0,8 |
| 3. Прокладка между проводниками стержня по высоте: миканит — 0,5 *мм* . . | 0,5 | |
| 4. Изоляция стержня: микалента ЛМС-1 0,13×35 *мм* (ГОСТ 4268—48) 18 слоев вполнахлеста . . . . . . . . . . . | 0,13×18×4 = 9,5 | 0,13×18×4 = 9,5 |
| 5. Изоляция стержня: лента асбестовая 0,5×30 *мм* (ТУНКХП № 147—11) 1 слой впритык . . . . . . . . . . . | 0,5×2 = 1,0 | 0,5×2 = 1,0 |
| 6. Прокладки между стержнями: картон ЭВТ . . . . . . . . . . . . . . | | 3,0 |
| 7. Прокладки на дно паза: картон ЭВТ | | 1,5 |
| 8. Прокладки под клин: картон ЭВТ . . | | 2,5 |
| 9. Клин буковый . . . . . . . . . . | | 6,5 |
| 10. Надклиновая часть . . . . . . . . | | 1,0 |
| 11. Лакировка асбестовой ленты . . . . . | 0,2 | 0,2 |
| 12. Допуск на разбухание . . . . . . . | 0,3 | 0,2 |
| 13. Зазор на укладку . . . . . . . . . | 0,5 | 0,5 |
| Всего . . . . . . . . . | 27,4 | 162,0 |

Принимаем окончательно $b_п = 2{,}75 \ см$; $h_п = 16{,}2 \ см$.

6. Точное значение плотности тока и линейной нагрузки:

$$s = \frac{I_N}{q_ф} = \frac{3765}{15{,}2} = 248 \ а/см^2 = 2{,}48 \ а/мм^2;$$

$$A = \frac{I_N s_п}{a t_1} = \frac{3765 \cdot 2}{2 \cdot 7{,}11} = 529 \ а/см.$$

7 Коэффициент заполнения паза медью

$$\varphi_{Cu} = \frac{q_ф s_п}{a h_п b_п} = \frac{15{,}2 \cdot 2}{2 \cdot 16{,}2 \cdot 2{,}75} = 0{,}34.$$

8 Размеры зубца:

$$b_{z_1} = t_1 - b_п = 7{,}11 - 2{,}75 = 4{,}36 \ см;$$

$$b_{z_{12}} = t_{12} - b_п = 7{,}23 - 2{,}75 = 4{,}48 \ см;$$

$$b_{z_{13}} = b_{13} - b_п = 7{,}34 - 2{,}75 = 4{,}59 \ см,$$

где $t_{12} = \frac{\pi (D + h_п)}{Z_1} = 7{,}23 \ см$; $t_{13} = \frac{\pi (D + 2h_п)}{Z_1} = 7{,}34 \ см.$



## VIII. Точное значение номинального потока, длин железа, числа пакетов и высоты ярма (§ 12-14)

1. Магнитный поток (основная волна)

$$\Phi_{1N} = \frac{E_ф}{\pi \sqrt{2} k_w f w} = \frac{7970}{\pi \sqrt{2} \cdot 0{,}915 \cdot 50 \cdot 81} = 0{,}484 \ вб,$$

где $E_ф = U_ф = 7970 \ в$ — электродвижущая сила фазы.

2. Расчетная длина

$$l_i = \frac{\Phi_{1N}}{\frac{2}{\pi} B_{\delta_1} \tau} = \frac{0{,}484}{\frac{2}{\pi} \cdot 0{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 48} = 175{,}8 \ см.$$

3. Принимаем ширину пакета $l' = 5 \ см$ (при радиальной вентиляции).

4. Число каналов

$$n_s = \frac{l_i - l'}{0{,}5 b_s + l'} = \frac{175{,}8 - 5}{0{,}5 + 5} = 31.$$

Принимаем $b_s = 1 \ см$ по стандарту (при аксиальной вентиляции $n_s = 0$).

5. Полная длина железа с каналами

$$l = l'(n_s + 1) + n_s b_s = 5 \cdot (31 + 1) + 31 = 191 \ см$$

(при аксиальной вентиляции $l \approx l_i = 175{,}8 \ см$).

6. Расчетная длина железа

$$l_i = l'(n_s + 1) + 0{,}5 n_s b_s = 5 \cdot (31 + 1) + 0{,}5 \cdot 31 = 175{,}5 \ см.$$

7. Длина чистого железа

$$l_{Fe} = l'(n_s + 1) k_п = 5 \cdot (31 + 1) \cdot 0{,}93 = 149 \ см,$$

где $k_п = 0{,}93$ для лакированного железа толщиной $\Delta = 0{,}5 \ мм$ (при аксиальной вентиляции $l_{Fe} = 0{,}93 \cdot 175{,}8 = 163 \ см$).

8. Для генератора выбираем сталь Э42 толщиной 0,5 *мм* с $p_{10} = 1{,}6 \ вт/кг$. Для уменьшения веера крайние листы делаются ступенчатыми (рис. 249).

9. Средняя индукция в зубцах

$$B_{z\,ср} = B_{\delta_1} \frac{t_1 l_i}{b_{z_{12}} l_{Fe}} = 0{,}9 \cdot 10^{-4} \frac{7{,}11 \cdot 175{,}5}{4{,}48 \cdot 149} = 1{,}68 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2.$$

Так как индукция не превосходит 2 $вб/м^2$, то размеры пазов и длины железа принимаем окончательно.

Для аксиальной вентиляции $B_{z\,ср} = 1{,}68 \cdot 10^{-4} \frac{149}{163} = 1{,}54 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2$. При $B_{z\,ср} = \text{const}$ возможно было бы сократить длину чистого железа. Мы оставляем $l_i$ неизменной, при этом получаем уменьшение потерь и сокращение расхода меди и изоляции благодаря уменьшению полной длины с 191 до 175 *см*, при некотором увеличении расхода стали статора и уменьшении расхода стали ротора.

10. Высота ярма статора

$$h_{j_1} = \frac{D_{j_1} - (D + 2h_п)}{2} = \frac{1160 - (1100 + 2 \cdot 16{,}2)}{2} = 13{,}8 \ см.$$

11. Индукция в ярме

$$B_{j_1} = \frac{\Phi}{2 l_{Fe} h_{j_1}} = \frac{0{,}484}{2 \cdot 149 \cdot 13{,}8} = 1{,}18 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2.$$

Так как $B_{j_1} < 1{,}5 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2$, то высоту ярма $h_{j_1}$ и диаметр можно принять окончательно.

При аксиальной вентиляции возможно несколько уменьшить высоту ярма и диаметр $D_{j_1}$, так как при $B_{j_1} = \text{const}$

$$h_{j_1} = 13{,}8 \cdot \frac{149}{163} = 12{,}6 \ см.$$

## IX. Вес зубцов ярма, меди, изоляции и ориентировочные потери в железе и в меди (§ 12-15)

1. Вес зубцов (в дальнейшем в скобках данные варианта с аксиальной вентиляцией)

$$G_z = Z_1 b_{z_{1/2}} h_п l_{Fe} \gamma_{Fe} = 486 \cdot 4{,}48 \cdot 16{,}2 \cdot 149 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 40\,600\ (43\,600)\ кг.$$

2. Вес ярма

$$G_{j_1} = \pi (D_{j_1} - h_{j_1}) h_{j_1} l_{Fe} \gamma_{Fe} = \pi \cdot (1160 - 13{,}8) \cdot 13{,}8 \cdot 149 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 57\,300\ (57\,300)\ кг.$$

3. Полный вес железа статора

$$G_{Fe} = G_z + G_{j_1} = 40\,600 + 57\,300 = 97\,900\ (100\,900)\ кг.$$

4. Потери в железе

$$p_{Fe} = [1{,}7\,(B_{z\,ср}\ вб/м^2)^2 G_z + 1{,}3\,(B_{j_1}\ вб/м^2)^2 G_{j_1}]\,p_{10} = (1{,}7 \cdot 1{,}68^2 \cdot 40\,600 + 1{,}3 \cdot 1{,}8^2 \cdot 57\,300) \cdot 1{,}6 = 480\,000\ вт = 480\ (442)\ квт,$$

$$p_{Fe}\% = \frac{p_{Fe}}{P_{2N}}\,100 = \frac{480}{72\,000} \cdot 100 = 0{,}665\%\ (0{,}615\%).$$

5. Ориентировочное значение средней длины витка

$$l_{w1} = 2\,[l + (1{,}6 \div 1{,}8)\,\tau y + (2 \div 7)\ см] = 2 \cdot (191 + 1{,}4 \cdot 48 + 7) = 530{,}4\ (500)\ см.$$

6. Вес меди

$$G_{Cu} = m l_{w_1} w_1 q_ф \gamma_{Cu} = 3 \cdot 530{,}4 \cdot 81 \cdot 15{,}2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 17\,400\ (16\,400)\ кг.$$

7. Активное сопротивление

$$r_{1\,(75)} = k_r \frac{\rho_{75} l_{w1} w_1}{q_ф} = 1{,}2\,\frac{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 530{,}4 \cdot 81}{15{,}2} = 0{,}00735\ (0{,}00692)\ ом,$$

где $k_r = 1{,}2$ — коэффициент вихревых токов (ориентировочно).

8. Потери в меди

$$p_{Cu1} = 3 I_N^2 r_1 = 3 \cdot 3765^2 \cdot 0{,}00735 = 313\,000\ вт = 313\ (295)\ квт;$$

$$p_{Cu1}\% = \frac{p_{Cu_1}}{P_{2N}}\,100 = \frac{313}{72\,000} \cdot 100 = 0{,}435\ (0{,}41)\ \%.$$

9. Вес изоляции обмотки статора

$$G_i = 0{,}5 \gamma_i Z_1 \Pi \frac{\Delta_п}{2} l_{w1} = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 486 \cdot 36{,}6\,\frac{1{,}2}{2{,}0} \cdot 530{,}4 = 5650\ кг,$$

где $\Pi = 2\,(b_п + h_п - h_{кл}) = 2 \cdot (2{,}75 + 16{,}2) = 36{,}6\ см;$

## X. Проверка статора на нагрев (§ 12-16)

1. Среднее превышение температуры железа под нагрузкой

$$\theta_{Fe} = \frac{p_{Fe} + p_{Cu}\dfrac{2l}{l_w}}{\alpha_{Fe} \pi D l} = \frac{480\,000 + 313\,000\,\dfrac{2 \cdot 191}{530{,}4}}{38 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 1100 \cdot 191} = 28{,}2°C < 35°C,$$

где $\alpha_{Fe} \approx k\tau = (7 \div 9) \cdot 10^{-4}\tau$ для машины с радиальными каналами в статоре. Принимаем $\alpha_{Fe} = 8 \cdot 10^{-4}\tau = 38 \cdot 10^{-3}\ вт/°C\,см^2$.

Для машины с аксиальной вентиляцией

$$\alpha_{Fe} = 28 \cdot 10^{-4} \left(0{,}5 + 1{,}7\,\frac{1160}{1100}\right)(1 + \sqrt{0{,}7 \cdot 48}) = 43{,}4 \cdot 10^{-3}\ вт/°C\,см^2;$$

$$\theta_{Fe} = \frac{(442 + 295 \cdot 0{,}725) \cdot 10^3}{43{,}4 \cdot 10^{-3}\pi \cdot 1100 \cdot 175{,}8} = 25°\,C.$$



2. Перепад температуры в изоляции паза

$$\theta_i = \frac{2 p_{Cu_1} \Delta_i}{Z_1 \Pi l_{w1} k_i} = \frac{2 \cdot 313000 \cdot 0{,}6}{486 \cdot 36{,}7 \cdot 530{,}4 \cdot 0{,}0017} = 23{,}4\ (23{,}4)\ °C,$$

где $\Delta_i = 0{,}6\ см$ — односторонняя толщина изоляции паза;

$k_i = 0{,}0017\ вт/°C\ см$ — коэффициент теплопроводности для изоляции класса $B$; $\Pi = 2\,(h_п + b_п - h_{кл}) = 2 \cdot (16{,}2 + 2{,}75 - 0{,}65) = 36{,}7\ см$ — периметр пазовой изоляции.

3. Превышение температуры меди над температурой входящего воздуха

$$\theta_{Cu} = \theta_{Fe} + \theta_i + \theta_a = 28{,}2 + 23{,}4 + 15 = 66{,}6\ (63{,}4)°\,C,$$

где $\theta_a$ — среднее превышение температуры охлаждающего воздуха в машине

$$\theta_a = \frac{1}{2}\,\frac{\Sigma' p}{1{,}1 V_a};$$

принимаем $\theta_a = 15\ °C$.

4. Температура меди

$$\theta^0_{Cu} = \theta_{Cu} + \theta^0_{вх} = 66{,}6 + 35 = 101{,}6\ °C,$$

где $\theta^0_{вх} = 35°\,C$ — температура входящего воздуха.

5. Требуемый расход воздуха

$$V_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Sigma' p}{1{,}1 \theta_a} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1845}{1{,}1 \cdot 15} = 56\ м^3/сек.$$

## XI. Воздушный зазор (§ 12-17).

1. Определение эффективного зазора по заданному о. к. з.

$$x_d = (1{,}06 \div 1{,}1)\,x_{ad} = \frac{1}{о.\,к.\,з.};\quad 1{,}1 x_{ad} = \frac{1}{1{,}25};\quad x_{ad} = 0{,}728\ \partial.\ e.;$$

$$\delta' = \mu_0 \frac{k_d F_{1N}}{B_{\delta 1} x_{ad}} = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}84 \cdot 1{,}048 \cdot 10^4}{0{,}9 \cdot 10^{-4} 0{,}728} = 1{,}68\ см,$$

$$где\ F_{1N} = \frac{1}{p}\,\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\,w_1 k_w I_N = \frac{1}{36}\,\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 81 \cdot 0{,}915 \cdot 3765 = 10\,480\ a;$$

$k_d = 0{,}84$ по рис. 267.

2. Действительный зазор

$$\delta = \frac{\delta'}{k_c} = \frac{1{,}68}{1{,}1} = 1{,}52\ см,$$

где $k_c = 1{,}1$ — выбран предварительно.

По условиям технологии и монтажа

$$\delta \geqslant 0{,}15\,(1 + D \cdot 10^{-2}) = 1{,}8\ см.$$

Выбираем $\delta = 1{,}85\ см$.

3. Максимальный воздушный зазор у края полюса

$$\delta_{max} = 1{,}5\delta = 1{,}5 \cdot 1{,}85 = 2{,}75\ см.$$

4. Коэффициент Картера

$$k_C = \frac{t_1}{t_1 - b_1} = \frac{7{,}11}{7{,}11 - 0{,}715} = 1{,}11,$$

$$b_1 = b_0 \frac{b_0}{5\delta + b_0} = 2{,}75 \cdot \frac{2{,}75}{5 \cdot 1{,}85 + 2{,}75} = 0{,}715\ см;$$

$$\delta' = k_C \delta = 1{,}11 \cdot 1{,}85 = 2{,}06\ см.$$

## XII. Полюсные наконечники ротора (§ 12-18)

1. Ширина полюсного наконечника

$$b_p = \alpha\tau = 0{,}72 \cdot 48 = 34{,}6 \text{ см}.$$

Выбираем $\alpha = 0{,}72$.

2. Ширина нажимной плиты полюсного наконечника

$$b' \approx b_p \approx 34 \text{ см}.$$

3. Длина штампованной части полюсного наконечника

$$l'_p = l - 2\Delta' = 191 - 2 \cdot 1{,}5 = 188 \text{ см},$$

где $\Delta' = 1{,}5$ *см* — толщина нажимной щеки.

4. Так как радиальные каналы отсутствуют, то расчетная длина наконечника $l_{pi} = l = 191$ *см*.

5. Радиус очертания полюсного наконечника (§ 3-2)

$$R_p = \frac{D}{2 \cdot \left[1 + \frac{4D(\delta_{max} - \delta)}{b_p^2}\right]} = \frac{1100}{2 \cdot \left[1 + \frac{4 \cdot 1100 \cdot (2{,}75 - 1{,}85)}{34{,}6^2}\right]} = 128 \text{ см}.$$

6. Высота полюсного наконечника

$$h_p = (0{,}1 \div 0{,}12)\,\tau = (4{,}8 \div 5{,}76) \text{ см};$$

выбираем округленно $h_p = 5$ *см*.

## XIII. Успокоительная обмотка (демпферная клетка) (§ 22-19)

1. Суммарное сечение стержней на полюс

$$\Sigma q_c = n_c q_c \approx (0{,}15 \div 0{,}3)\frac{A\tau}{s} = 0{,}16\frac{529 \cdot 48}{248} = 16{,}5 \text{ см}^2.$$

Выбираем минимальное сечение.

2. Шаг пазов успокоительной обмотки

$$t_к \approx t_1 = 7 \text{ см}.$$

3. Число стержней на полюс и их сечение

$$n_c = \frac{b_p}{t_к} = \frac{34{,}6}{7} \approx 5;$$

$$q_c = \frac{\Sigma q_c}{n_c} = \frac{16{,}5}{5} = 3{,}3 \text{ см}^2.$$

Выбираем медные стержни диаметром $d_c = 1{,}9$ *см*. Сечение стержня

$$q_c = \frac{\pi}{4}\, d_c^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 1{,}9^2 = 2{,}83 \text{ см}^2.$$

Сечение стержней на полюс

$$\Sigma q_c = 5 \cdot 2{,}83 = 14{,}15 \text{ см}^2.$$

Принимаем полузакрытые пазы. Высота и ширина паза:

$$h_{ок} = 0{,}3 \text{ см}; \; b_{ок} = 0{,}3 \text{ см}.$$

4. Поперечное сечение короткозамыкающего кольца должно составлять 40—50% от $\Sigma q_c$. Выбираем медное кольцо сечением 7,5 *см²*.



## XIV. Полюсные сердечники (§ 12-20)

1. Ширина полюсного сердечника

$$b_m = \frac{\sigma\Phi_1}{l_{pi}B_m\varphi_{Fe\,m}} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}484}{191 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-4} 0{,}95} = 21{,}3 \text{ см},$$

где $\sigma = 1{,}2$ — коэффициент рассеяния, принимается предварительно;
$\varphi_{Fe\,m} = 0{,}95$ — коэффициент заполнения листов сердечника полюса железом.

Принимаем с запасом $b_m = 23$ *см*; $B_m = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *вб/см²* (выбираем).

2. Ориентировочная высота полюсного сердечника.

Из векторной диаграммы рис. 270

$$F_{1N} = i_{fN}w_f = H_{Cu\,f}b_{Cu\,f}s_f \approx F_{1N}\sqrt{\frac{1}{x_{ad}^2} + 1 + \frac{2}{x_{ad}}\sin\varphi_N} =$$

$$= 10\,480 \cdot \sqrt{\frac{1}{0{,}728^2} + 1 + \frac{2}{0{,}728} \cdot 0{,}6} = 22\,300 a;$$

$$H_{Cu\,f} = \frac{F_{fN}}{s_f b_{Cu\,f}} = \frac{22\,300}{250 \cdot 5{,}8} = 15{,}4 \text{ см},$$

где $s_f = 250$ *а/см²* — плотность тока в обмотке возбуждения согласно табл. 81;

$$b_{Cu\,f} \approx \frac{b_p - b_m}{2} = \frac{34{,}6 - 23}{2} = 5{,}8 \text{ см}.$$

Высота сердечника с учетом изоляции

$$h_m = 1{,}15\, H_{Cu\,f} + 5 \text{ см} = 1{,}5 \cdot 15{,}4 + 5 = 22{,}7 \text{ см}.$$

Окончательно высота определяется после расчета магнитной цепи, укладки обмотки возбуждения и проверки ее на нагрев. Общая высота полюса

$$h'_m = h_m + h_p = 22{,}7 + 5 = 27{,}7 \text{ см}.$$

3. Сечение нажимных плит (щек)

$$Q'_m = 2 \cdot 23 \cdot 1{,}5 = 69 \text{ см}^2,$$

где $\Delta' = 1{,}5$ *см* — толщина плиты.

Общее сечение полюса и двух плит

$$Q_m = b_m l_m \varphi_{Fe\,m} + Q'_m = 23 \cdot 188 \cdot 0{,}95 + 69 = 4\,178 \text{ см}^2.$$

Индукция в полюсе

$$B_m = \frac{\sigma\Phi_1}{Q_m} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}484}{4178} = 1{,}39 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2.$$

## XV. Внутренний диаметр и высота ярма (обода) ротора (§ 12-20)

1. Высота ярма ротора по условиям насыщения (рис. 268)

$$h_{j2} = \frac{\sigma\Phi_1}{2l_{j2}B_{j2}} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}484}{2 \cdot 205 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-4}} = 12{,}9 \text{ см}.$$

Длина обода ротора (ярма)

$$l_{j2} = l + (10 \div 15) \text{ см} = 191 + 14 = 205 \text{ см}.$$

По условиям механической прочности рабочая высота обода предварительно выбирается на основании данных опыта: $h'_{j2} = (1{,}4 \div 1{,}5)\,h_m$; примем $h'_{j2} = 1{,}5h_m = 1{,}5 \cdot 27{,}7 = 41{,}5$ *см*. Обод шихтованый. С учетом вырезов под крепление полюсов $h_{j2} = 51$ *см*.

2. Внутренний диаметр ротора

$$D_{j2} = D - 2(\delta + h'_m + h_{j2}) = 1100 - 2 \cdot (1{,}85 + 27{,}7 + 51) = 939 \text{ см}.$$

## XVI. Проводимость от потока рассеяния между полюсами

$$\lambda_{s2} = \lambda_m + \lambda_p = 2{,}1 + 1{,}53 = 3{,}63,$$

где $\lambda_m$ — проводимость между полюсными сердечниками

$$\lambda_m = 4\left(\frac{h_m}{2c_m} + 0{,}41\frac{h_m}{l}\right) = 4\left(\frac{22{,}7}{2\cdot 23{,}8} + 0{,}41\frac{22{,}7}{191}\right) = 2{,}1;$$

$\lambda_p$ — проводимость между полюсными наконечниками

$$\lambda_p = 4\left(\frac{h_{pm}}{c_p} + 1{,}35\frac{h_{pm}}{l}\right) = 4\left(\frac{4{,}7}{13{,}4} + 1{,}35\frac{4{,}7}{191}\right) = 1{,}53.$$

Расчетная высота полюсного наконечника

$$h_{pm} = \frac{2h_p + h'_p}{3} = \frac{2\cdot 5 + 4{,}1}{3} = 4{,}7\ см.$$

Расстояние между полюсными наконечниками

$$c_p = \tau - b_p = 48 - 34{,}6 = 13{,}4\ см.$$

Среднее расстояние между полюсными сердечниками

$$c_m \doteq \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - h_m)}{2p} - b_m = \frac{3{,}14(1100 - 2\cdot 1{,}85 - 2\cdot 5 - 22{,}7)}{72} - 23 = 23{,}5\ см.$$

## XVII. Характеристика намагничивания (§ 12-21)

Расчет характеристики намагничивания сведен в табл. 87.

## XVIII. Построение диаграммы Потье и определение м. д. с. возбуждения при номинальной нагрузке

1. Реактивность реакции якоря по продольной оси

$$x_{ad} = k_d\frac{F_{1N}}{F_\delta} = 0{,}84\frac{10\,480}{13\,500} = 0{,}65.$$

2. Реактивность рассеяния $x_s$ по § 4-6

$$x_s = 2\pi\mu_0\frac{F_{1N}l_i}{k_w^2\Phi_1}\cdot\frac{2p}{Z_1}(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_к) + \left[\frac{5}{8}\left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2 + \sigma_В\right]x_{ad} =$$

$$= 2\pi\cdot 1{,}256\cdot 10^{-8}\frac{10\,480\cdot 175{,}5}{0{,}915^2\cdot 0{,}484}\cdot\frac{72}{486}(1{,}92 + 0{,}256 + 0{,}47) +$$

$$+ \frac{5}{8}\left(\frac{72}{486}\right)^2\cdot 0{,}65 = 0{,}149,$$

где

$$\lambda_п = \left(\frac{h_0}{b_0} + \frac{h_1}{3b_п}\right) = \frac{3\cdot 0{,}815 + 1}{4}\left(\frac{1{,}5}{2{,}75} + \frac{13{,}9}{3\cdot 2{,}75}\right) = 1{,}92;$$

$$\lambda_л = \frac{0{,}3DZ_1(3y - 1)}{2p^2l_i2} = \frac{0{,}3\cdot 1100\cdot 486}{2\cdot 36^2\cdot 175{,}5}\cdot\frac{3\cdot 0{,}815 - 1}{2} = 0{,}256;$$

$$\lambda_к = \frac{5\delta'}{5b_0 + 4\delta'} = \frac{5\cdot 2{,}06}{5\cdot 2{,}75 + 4\cdot 2{,}06} = 0{,}47;$$

$\sigma_В$ — определяется по рис. 26; при $y = 0{,}815$ $\sigma_В$ пренебрегаем.

3. Синхронная реактивность по продольной оси

$$x_d = x_{ad} + x_s = 0{,}65 + 0{,}149 = 0{,}799.$$



Таблица 87

**Расчетные данные для построения характеристики намагничивания**

| Наименование и формула | Единицы измерения | $k=0{,}55$ | $k=1{,}0$ | $k=1{,}21$ | $k=1{,}33$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Э. д. с. $E_0 = kU_ф$ | в | 4380 | 7970 | 9640 | 10 600 |
| Поток основной волны $\Phi_1 = \frac{E_0}{\pi\sqrt{2}k_w wf}$ | вб | 0,266 | 0,484 | 0,586 | 0,644 |
| Действительная индукция в воздушном зазоре $B_\delta = \frac{B_{\delta_1}}{k_1} = \frac{1}{k_1}\frac{\Phi_1}{\frac{2}{\pi}\tau l_i}$, где $k_1$ по рис. 13 | вб/м² | 0,453 | 0,825 | 1,000 | 1,095 |
| Идеальные индукции в трех сечениях зубца: $B'_{z_1} = B_\delta\frac{t_1l_i}{bz_1l_{Fe}}$; | » | 0,87 | 1,58 | 1,92 | 2,10 |
| $B'_{z_{12}} = B'_{z_1}\frac{b_{z_1}}{b_{z_{12}}}$; | » | 0,850 | 1,550 | 1,875 | 2,050 |
| $B'_{z_{13}} = B'_{z_1}\frac{b_{z_1}}{b_{z_{13}}}$ | » | 0,887 | 1,50 | 1,825 | 2,00 |
| Индукция в ярме статора $B_{j_1} = \frac{\Phi}{2l_{Fe}h_{j_1}}$ | » | 0,650 | 1,18 | 1,420 | 1,57 |
| Коэффициенты $k_z = \frac{b_п l_i}{b_z l_{Fe}}$ | $k_{z_1}=0{,}809$<br>$k_{z_2}=0{,}79$<br>$k_{z_3}=0{,}77$ | | | | |
| Удельная м. д. с. зубцов и ярма: $aw_{z_1}$ | а/см | 3,03 | 60 | 312 | 425 |
| $aw_{z_2}$ | » | 2,89 | 50 | 275 | 405 |
| $aw_{z_3}$ | » | 2,72 | 38,5 | 220 | 386 |
| $aw_z = \frac{aw_{z_1} + 4aw_{z_2} + aw_{z_3}}{6}$ | » | 2,87 | 49,8 | 272 | 405 |
| $aw_{j_1}$ | » | 1,16 | 4,11 | 12,7 | 26,7 |
| М. д. с. на: зазор $2F_\delta = \frac{2}{\mu_0}B_\delta\delta'$ | а | 14 850 | 27 000 | 32 700 | 35 900 |
| ярмо $2F_1 \approx aw_{j_1}\tau$ | » | 56 | 198 | 610 | 1 280 |
| зубцы $2F_{z_1} = aw_z 2h_п$ | » | 93 | 1 610 | 8 800 | 13 100 |

| Наименование и формула | Единицы измерения | $k=0{,}55$ | $k=1{,}0$ | $k=1{,}21$ | $k=1{,}33$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент рассеяния при холостом ходе $\sigma = 1 + \frac{\lambda_{s_2} 0{,}4\pi l_p (F_\delta + F_{j_1} + F_z)}{\Phi_1 \cdot 10^8}$ | — | 1,274 | 1,288 | 1,346 | 1,395 |
| Поток в полюсах $\Phi_m = \sigma\Phi_1$ | *вб* | 0,338 | 0,623 | 0,790 | 0,884 |
| Индукция в сердечнике $B_{m1} = \frac{\Phi_m}{Q_m}$ | *вб/м²* | 0,81 | 1,49 | 1,89 | 2,11 |
| Индукция в верхнем сечении сердечника $B_{m_2} = B_{m_1} \frac{(\sigma - 1)\frac{\lambda_p}{\lambda_{s_2}} + 1}{\sigma}$ | » | 0,72 | 1,31 | 1,63 | 1,80 |
| Индукция в среднем сечении сердечника $B_{m_3} = B_{m_2} + \frac{3}{4}(B_{m_1} - B_{m_2})$ | » | 0,786 | 1,445 | 1,825 | 2,043 |
| Удельные м. д. с. | | | | | |
| $aw_{m_1}$ | *а/см* | 4,1 | 21,1 | 178 | 463 |
| $aw_{m_2}$ | » | 3,9 | 17,2 | 133 | 348 |
| $aw_{m_3}$ | » | 3,55 | 11,1 | 48 | 119 |
| $aw_m = \frac{aw_{m_1} + 4aw_{m_2} + aw_{m_3}}{6}$ | » | 3,87 | 16,83 | 126,3 | 314 |
| М. д. с. на пару полюсных сердечников $2F_m = aw_m 2h'_m$ | *а* | 214 | 930 | 7 000 | 17 400 |
| Полная м. д. с. на пару полюсов | | | | | |
| $2F_\delta$ | » | 14 850 | 27 000 | 32 700 | 35 900 |
| $2F_{\text{Fe}}$ | » | 363 | 2 738 | 16 410 | 31 780 |
| $2\Sigma F = 2(F_\delta + F_z + F_{j_1} + F_m)$ | » | 15 213 | 29 738 | 49 110 | 67 680 |
| На полюс $\Sigma F$ | *а* | 7 606 | 14 869 | 24 555 | 33 840 |
| Кратность тока возбуждения | — | 0,512 | 1 | 1,65 | 2,27 |
| Нормальная характеристика крупных гидрогенераторов | — | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 |



4. Синхронная реактивность по поперечной оси

$$x_q = x_{aq} + x_s = 0{,}396 + 0{,}149 = 0{,}545,$$

где

$$x_{aq} = k_q \frac{F_{1N}}{F_\delta} = 0{,}51 \cdot \frac{10\,480}{13\,500} = 0{,}396;$$

$$k_q = 0{,}51 \text{ — по рис. 267.}$$

5. Диаграмма Потье построена на рис. 282. Из диаграммы находим, что при номинальной нагрузке и $\cos\varphi_N = 0{,}8$

$$F_{fN} = 1{,}68 F_{f_0} = 1{,}68 \cdot 14\,869 = 24\,800 \ a.$$

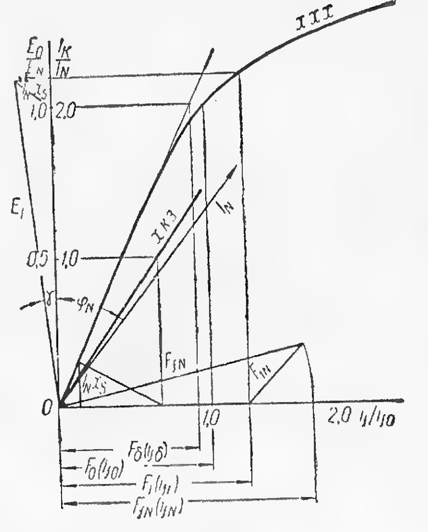



Рис. 282. Характеристики холостого хода, короткого замыкания и диаграмма Потье.

## XIX. Расчет обмотки возбуждения (§ 12-22)

1. Напряжение возбудителя выбираем повышеное $U_f = 300$ *в*.

2. Сечение меди обмотки возбуждения при $\theta_f^0 = 130°$C

$$q_f = \rho_{130} \frac{2pF_{fN} l_{wf}}{U_f} =$$

$$= 2{,}56 \cdot 10^{-6} \frac{72 \cdot 24\,800 \cdot 452}{300} =$$

$$= 7{,}05 \ см^2,$$

где $\rho_{130} = 2{,}56 \cdot 10^{-6}$ *ом·см* — удельное сопротивление меди при $\theta_f^0 = 130°$C;

$$l_{wf} \approx 2l - b_m + \pi(b_m + b_f + 0{,}8 \ см) = 2{,}191 - 23 + \pi(23 + 5{,}8 + 0{,}8) =$$

$= 452$ *см* — длина витка обмотки возбуждения;

$$b_f \approx \frac{b_p - b_m}{2} = \frac{34{,}6 - 23}{2} = 5{,}8 \ см$$ — ширина обмотки возбуждения.

3. Плотность тока возбуждения выбирается из условий допустимого перегрева

$$s_f = \sqrt{\frac{\alpha_f}{\rho_0 b_{\text{Cu}\,f}} \theta_f} = \sqrt{\frac{0{,}0111}{2{,}56 \cdot 10^{-6} \cdot 4{,}64}} \cdot 75 = 264 \ а/см^2,$$

где $b_{\text{Cu}\,f} = 0{,}4(b_p - b_m) = 4{,}64$ *см*;

$\alpha_f = 0{,}0111$ *вт/°C см²* определяется по рис. 62.

4. Ток возбуждения при номинальном режиме и число витков

$$i_{fN} = s_f q_f = 264 \cdot 7{,}05 = 1860 \ a; \quad w_f = \frac{F_{fN}}{i_{fN}} = \frac{24\,800}{1860} = 13{,}3;$$

принимаем $w_f = 14$, тогда $i_{fN} = \frac{F_{fN}}{w_f} = \frac{24\,800}{14} = 1775$ *а*.

Выбираем шинную медь $60 \times 11{,}6$ *мм*, $q_f = 6{,}9$ *см²* (690 *мм²*). Плотность тока

$$s_{fN} = \frac{1775}{6{,}9} = 258 \ а/см^2.$$

5. Высота: межвитковой изоляции

$$15 \times 0{,}05 = 0{,}75 \ \text{см};$$

меди полюса

$$H_{\text{Cu}} = 14 \cdot 1{,}16 = 16{,}25 \ \text{см};$$

полюсного сердечника с учетом прессующих прокладок

$$h_m = 16{,}25 + 0{,}75 + 5{,}7 = 22{,}7 \ \text{см}.$$

6. Сопротивление обмотки возбуждения при различных температурах

$$r_{f\,(15)} = \rho_{15} \frac{2pl_{wf}w_f}{q_f} = 1{,}75 \cdot 10^{-6} \frac{72 \cdot 452 \cdot 14}{6{,}9} = \mathbf{0{,}114} \ \textbf{ом};$$

$$r_{f\,(75)} = 1{,}24 r_{f\,(15)} = 1{,}24 \cdot 0{,}114 = 0{,}141 \ \text{ом};$$

$$r_{f\,(130)} = 1{,}46 r_{f\,(15)} = 1{,}46 \cdot 0{,}114 = 0{,}168 \ \text{ом}.$$

7. Напряжение на кольцах ротора:
номинальное $U_{fN} = U_{f\ \text{гор}} = r_{f130}\, i_{fN} = 0{,}168 \cdot 1775 = \mathbf{300} \ \textbf{в}.$
при холостом ходе и холодной машине

$$U_{f_0} = r_{f\,(15)} i_{f_0} = 0{,}114 \cdot \frac{1775}{1{,}68} = 120 \ \text{в}.$$

8. Минимальное напряжение возбудителя

$$U_{f\,\min} \approx 0{,}5 U_{f_0} = 60 \ \text{в}.$$

9. Потолочное напряжение возбудителя («потолок»)

$$U_{f\,\max} = (1{,}4 \div 2)\, U_{fN} = 1{,}7 \cdot 300 = 510 \ \text{в}.$$

10. Скорость нарастания напряжения («взлет»)

$$\frac{U_f}{t} = (1 \div 1{,}5)\, U_{fN} = (300 \div 450) \ \text{в/сек}.$$

11. Максимальный ток возбуждения при потолочном напряжении

$$i_{f\,\max} = \frac{U_{f\,(\max)} - 5}{r_{f\,(130)}} = \frac{510 - 5}{0{,}168} = 3000 \ a.$$

12. Мощность возбуждения:
номинальная

$$P_{fN} = U_{fN}\, i_{fN} + \Delta U i_{fN} = 300 \cdot 1775 + 2 \cdot 1775 = 536\,000 \ \text{вт} \ (536 \ \textbf{квт});$$

кратковременная (6-секундная)

$$P_{f\,\max} = U_{f\,\max} i_{f\,\max} = 510 \cdot 3000 = 1\,530\,000 \ \text{вт} \ (1530 \ \text{квт}).$$

13. Перегрев обмотки возбуждения

$$\theta_f = \frac{P_f}{\alpha_f S_f k_\beta} = \frac{528\,000}{0{,}019 \cdot 5{,}26 \cdot 10^4 \cdot 0{,}58} = 91{,}2^\circ\text{C},$$

где $S_f = S_f' + S_f''$ — суммарная поверхность охлаждения обмоток полюсов (лобовая и междуполюсная поверхность)

$$S_f = H_{\text{Cu}\,f} l_{wf} k_s 2p = 16{,}25 \cdot 452 \cdot 1{,}0 \cdot 72 = 5{,}26 \cdot 10^4 \ \text{см}^2; \ k_s \approx 1{,}0$$

$$\alpha_f = 0{,}019 \ \text{вт/°C} \cdot \text{см}^2 \ (\text{по рис. 62}); \ k_\beta = 0{,}58.$$

15. Потери в меди полюсов

$$p_f = i_{fN}^2 r_{f\,(130)} = 1775^2 \cdot 0{,}168 = 528\,000 \ \text{вт}.$$



## XX. Расчет веса и характеристика использования активных материалов

1. Вес меди обмотки статора $G_{\text{Cu}_1} = 17\,400$ *кг*.

2. Вес изоляции обмотки статора

$$G_i = 2\gamma_i Z_1 (h_c + b_c - 2\Delta_i)\, \Delta_i l_{w_1} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 486 \cdot (7{,}32 + 2{,}69 - 1{,}2) \cdot 0{,}6 \times 530{,}4 = 5460 \ \text{кг},$$

где $\gamma_i = 2 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*$^3$;
$h_c = 7{,}32$ *см* — высота изолированной секции;
$b_c = 2{,}69$ *см* — ширина изолированной секции.

3. Вес меди обмотки возбуждения

$$G_{\text{Cu}\,f} = 2pw_f l_{wf} q_f \gamma_{\text{Cu}} = 72 \cdot 14 \cdot 452 \cdot 6{,}9 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 28\,000 \ \text{кг}.$$

4. Вес меди успокоительной обмотки

$$G_{\text{Cu}\,kd} = (2pn_c l_{kd} q_c + \pi D_{\text{лк}} q_{\text{лк}})\, \gamma_{\text{Cu}} = (72 \cdot 5 \cdot 198 \cdot 2{,}83 + 3440 \cdot 7{,}5) \times 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 1985 \ \text{кг}.$$

5. Суммарный вес меди

$$G_{\text{Cu}} = G_{\text{Cu}_1} + G_{\text{Cu}\,f} + G_{\text{Cu}\,kd} = 17\,400 + 28\,000 + 1985 = 47\,385 \ \text{кг}.$$

6. Вес меди на 1 *ква*

$$g_{\text{Cu}} = \frac{G_{\text{Cu}}}{P_N} = \frac{47\,385}{90\,000} = \mathbf{0{,}526} \ \textbf{кг/ква}.$$

7. Суммарный вес железа статора

$$G_{\text{Fe}} = G_z + G_{j_1} = 40\,600 + 57\,300 = 97\,900 \ \text{кг}.$$

8. Вес железа статора на 1 *ква*

$$g_{\text{Fe}} = \frac{G_{\text{Fe}}}{P_N} = \frac{97\,900}{90\,000} = \mathbf{1{,}078} \ \textbf{кг/ква}.$$

9. Вес полюсов

$$G_m = 2p\,(h_m b_m + h_{pm} b_p)\, l_p \gamma_{\text{Fe}} = 72 \cdot (22{,}7 \cdot 23 + 4{,}7 \cdot 34{,}6) \cdot 191 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 73\,500 \ \text{кг}.$$

10. Вес обода

$$G_{j_2} = \pi D_{j_2}' l_{j_2} h_{j_2} \gamma_{\text{Fe}} = 3{,}14 \cdot 992 \cdot 205 \cdot 51 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 252\,000 \ \text{кг}.$$

11. Суммарный вес железа статора, полюсов и обода без учета конструктивных материалов

$$G_{\text{Fe}}' = G_{\text{Fe}} + G_m + G_{j_2} = 97\,900 + 73\,500 + 252\,000 = 423\,400 \ \text{кг}.$$

14. Полный вес железа на 1 *ква*

$$g_{\text{Fe}}' = \frac{G_{\text{Fe}}'}{P_N} = \frac{423\,400}{90\,000} = 4{,}70 \ \text{кг/ква}.$$

15. Производный вес активных материалов

$$g_{\text{пр}} = \frac{G_{\text{Cu}} + G_{\text{Fe}}' \dfrac{m_{\text{Fe (ср)}}}{m_{\text{Cu (ср)}}}}{\left(\dfrac{P_N}{n}\right)^{3/4}} = \frac{47\,385 + 423\,400 \cdot \dfrac{1{,}5}{35}}{\left(\dfrac{90\,000}{1{,}388}\right)^{3/4}} = 16{,}5,$$

где $m_{\text{Cu (ср)}}$ — с учетом стоимости изоляции.

XXI. Потери к. п. д. (§ 12-23)

1. Основные потери в меди статора

$$p_{Cu\,(осн)} = 3I_N^2 r_{1\,(75)} = 3 \cdot 3765^2 \cdot 0{,}00613 = 260\,000\ вт = 260\ \mathbf{квт};$$

$$r_{1\,(75)} = \rho_{75} \frac{w_1 l_{w_1}}{q_ф} = 2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{81 \cdot 530{,}4}{15{,}2} = 0{,}00613\ ом.$$

2. Добавочные потери в меди статора

$$p_{Cu\,(доб)} = p_{Cu\,(осн)} (k_r - 1) = 260 \cdot (1{,}213 - 1) - 55{,}4\ квт.$$

Коэффициент сопротивления

$$k_r = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi) = 1{,}00 + \frac{40^2 - 1}{3} \cdot 0{,}0004 = 1{,}213,$$

где

$$\xi = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\rho} \frac{nb}{b_п}}\, h_{пр} = \sqrt{\frac{1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 314 \cdot 1{,}54}{2 \cdot 2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}75}} \cdot 0{,}263 = 0{,}187;$$

$$\varphi(\xi) = 1 + \frac{4}{45} \xi^4 = 1{,}00; \quad \psi(\xi) = \frac{1}{3} \xi^4 = 0{,}0004.$$

3. Суммарные потери в меди статора

$$p_{Cu_1} = p_{Cu\,(осн)} + p_{Cu\,(доб)} = 260 + 55{,}4 = 315{,}4\ квт.$$

4. Потери в железе зубцов и в железе ярма статора по гл. V и § 12-15

$$p_z = k_z p_z' \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_z = 1{,}7 \cdot 3{,}84 \cdot 1 \cdot 40\,600 = 265\,000\ вт = 265\ \mathbf{квт},$$

где $k_z = 1{,}7$ — для машин мощностью свыше 100 *ква*;

$$p_z' = p_{10} (B_{z_{1з}}\ вб/м^2)^2 = 1{,}6 \cdot (1{,}55)^2 = 3{,}84\ вт/кг,$$

где $p_{10} = 1{,}6$ *вт/кг* для стали Э41 при $B = 1{,}0$ *вб/м²*.

Потери в железе ярма статора

$$p_{j_1} = k_j p_j' \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_{j_1} = 1{,}3 \cdot 2{,}23 \cdot 1 \cdot 57\,300 = 166\,000\ вт = 166\ квт,$$

где $k_j = 1{,}3$; $p_{j_1}' = p_{10} (B_{j_1}\ вб/м^2)^2 = 1{,}6 \cdot 1{,}18^2 = 2{,}23\ вт/кг.$

5. Суммарные потери в железе

$$p_{Fe} = p_z + p_{j_1} = 265 + 166 = 431\ \mathbf{квт}.$$

6. Добавочные потери на поверхности полюсных наконечников на холостом ходу по гл. 5.

$$p_0 = 0{,}5k_0' (B_0 k_{\nu r} t_1)^2 (Z_1 n)^{1,5} S_R = 0{,}5 \cdot 3000\,(0{,}0825 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}6 \cdot 7{,}11)^2 \times$$
$$\times (486 \cdot 1{,}388)^{1,5} \cdot 46{,}9 \cdot 10^4 = 14\,400\ вт\ (14{,}4\ квт),$$

где $B_0 \approx (k_c - 1) B_\delta = (1{,}1 - 1)\, 0{,}825 \cdot 10^{-4} = 0{,}0825 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2;$

$$S_R = 2pb_p l_p = 72 \cdot 34{,}6 \cdot 191 = 46{,}9 \cdot 10^4\ см^2;$$

$k_0' = 3000$ по табл. 6 для $\Delta = 1{,}5$ *мм*; $k_{\nu r} = 0{,}6$ по рис. 32.

7. Добавочные потери при нагрузке:
от 3-ей гармонической в железе зубцов

$$p_{z_3} = 10{,}7\, p_{10} (B_3\ вб/м^2)^{\frac{5}{4}} G_z = 10{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot (0{,}229)^{5/4} \cdot 40\,600 =$$
$$= 102\,000\ вт = 102\ квт,$$



где $B_3 = B_{z_{1з}} (A_{3m} x_d + 1{,}27 x_{ad} A_{30}) = 1{,}55\,(0{,}1 \cdot 0{,}799 + 1{,}27 \cdot 0{,}65 \times$
$\times 0{,}087) = 0{,}229\ вб/м^2;$

$$\left.\begin{aligned} A_{3m} &= A_1 B_1 - 0{,}7 = 1{,}88 \cdot 0{,}425 - 0{,}7 = 0{,}1 \\ A_{30} &= A_1 A_2 = 0{,}42 \cdot 0{,}21 = 0{,}087 \end{aligned}\right\}\ \text{по рис. 35;}$$

на поверхности полюсов от зубчатости м. д. с. статора

$$p_{zR} = 0{,}5k_0' (B_{zR} t_1)^2 (Z_1 n)^{1,5} S_R = 0{,}5 \cdot 3000\,(0{,}073 \cdot 10^{-4} \cdot 7{,}11)^2 \times$$
$$\times (486 \cdot 1{,}388)^{1,5} \cdot 46{,}9 \cdot 10^4 = 35\,000\ вт = 35\ квт,$$

где $B_{zR} = \sqrt{2}\, \mu_0 \frac{At_1}{2\delta} k_\nu k_{\nu r} = \sqrt{2} \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{529 \cdot 7{,}11}{2 \cdot 1{,}85} \cdot 0{,}675 \cdot 0{,}6 =$

$$= 0{,}073 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2; \quad k_\nu = \frac{\pi Z_1 \delta}{\tau p\, \mathrm{sh} \frac{\pi Z_1 \delta}{\tau p}} = 0{,}675; \quad k_{\nu r} = 0{,}6;$$

на поверхности полюсов от высших гармонических м. д. с. статора

$$p_{\nu R} = S_R \frac{8}{\pi^2} k_0' A^2 \tau^4 \mu_0^2 f^{1,5} \left(\frac{k_{\nu r}}{\delta'}\right)^2 k_\nu^2 \varphi_1(y) = 1440\ вт = 1{,}44\ квт,$$

где $k_\nu$ и $k_{\nu r}$ приняты равными единице;
$\varphi_1(y)$ определяется по рис. 34;
в нажимных плитах и щитах

$$p_{пл} = 0{,}1 \frac{2{,}8 \cdot 10^{-7}}{a^{2/3}} \pi \left(D + \frac{\tau}{4}\right) F_{1N}^2 =$$

$$= 0{,}1 \frac{2{,}8 \cdot 10^{-7}}{9{,}8^{2/3}} \cdot \pi \cdot \left(1100 + \frac{48}{4}\right) \cdot 10\,480^2 = 2300\ вт = 2{,}3\ квт,$$

$$\text{где } a \approx \frac{\tau y}{4} = \frac{48 \cdot 0{,}815}{4} = 9{,}8\ см.$$

8. Суммарные добавочные потери

$$p_{доб} = p_0 + p_{Cu\,(доб)} + p_{z_3} + p_{zR} + p_{\nu R} + p_{пл} = 14{,}4 + 55{,}4 + 102 +$$
$$+ 35 + 1{,}44 + 2{,}3 = 211{,}5\ квт.$$

Для машин свыше 1000 *ква*

$$p_{доб} \leqslant 0{,}004 P_{2N} = 288\ \mathbf{квт}.$$

Полученные по расчету $p_{доб} = 211{,}5\ квт < 288\ квт.$

9. Потери на возбуждение

$$p_f = \frac{i_f^2 r_{f\,(75)} + \Delta U i_{fN}}{\eta_в} = \frac{1775^2 \cdot 0{,}141 + 2 \cdot 1775}{0{,}85} = 528\,000\ вт = 528\ квт,$$

где $\eta_в = 0{,}85$ — к. п. д. возбудителя;
$\Delta U = 2в$ — падение напряжения в контакте щеток и колец.

10. Механические потери (на трение и вентиляцию) рассчитываются по гл. 5.

Потери на трение по рис. 48

$$p_т = 160\ \mathbf{квт}.$$

Вентиляционные потери

$$p_v = p_{v_1} + p_{v_2} = 141 + 312 = 453\ \mathbf{квт};$$

$$p_{v_1} \approx 1{,}1 V v_a^2 = 1{,}1 \cdot 56 \cdot 48^2 = 141\,000\ вт = 141\ квт;$$

$$p_{v_2} = 1{,}5 \cdot 10^{-6}\, \omega^3 D^5 \left(1 + 5\frac{l_R}{D}\right) = 1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 8{,}74^3 \times$$
$$\times 11^5 \left(1 + 5 \cdot \frac{205}{1100}\right) = 312\ квт.$$

11. Суммарные потери

$$\Sigma p = p_{Cu\,(осн)} + p_{Fe} + p_f + p_т + p_v + p_{доб} = 260 + 431 + 528 + 160 + 453 + 211{,}5 = 2044\ квт.$$

12. К. п. д. генератора

$$\eta_N = 1 - \frac{\Sigma p}{p_{2N} + \Sigma p} = 1 - \frac{2044}{72\,000 + 2044} = 1 - 0{,}027 = 0{,}973,$$

или $\eta_N = 97{,}3\%$. Заданный $\eta = 97{,}5\%$; отклонение

$$\Delta\eta\% = \frac{97{,}3 - 97{,}5}{97{,}5} = -0{,}2\%$$

в пределах допустимого.

## XXII. Параметры (§ 12-24)

1. Реактивность основной волны поля реакции якоря по продольной оси

$$x_{ad} = 0{,}65\ \text{(рассчитана выше).}$$

2. Реактивность рассеяния якоря в долях единицы

$$x_s = 0{,}149.$$

3. Синхронная реактивность якоря в продольной оси

$$x_d = x_{ad} + x_s = 0{,}65 + 0{,}149 = 0{,}799.$$

4. Синхронная реактивность якоря в поперечной оси

$$x_q = x_{aq} + x_s = 0{,}396 + 0{,}149 = 0{,}545,$$

где $x_{aq} = 0{,}396$ — реактивность поперечной реакции якоря.

5. Активное сопротивление якоря

$$r_{1\,(75)} = 0{,}00613\ ом;$$

$$r_1 = \frac{r_{1\,(75)} I_N}{U_ф} = \frac{0{,}00613 \cdot 3765}{7970} = 0{,}0029;$$

$$r_1\% = 0{,}29\%.$$

6. Реактивность рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{fs} = \frac{\frac{4}{\pi}\mu_0 \lambda_{fs} l k_d^2 F_{1N}}{\Phi_N} = \frac{\frac{4}{\pi} \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 2{,}98 \cdot 191 \cdot 0{,}84^2 \cdot 10\,480}{0{,}484} = 0{,}139,$$

где

$$\lambda_{fs} = 4\left(\frac{h_m}{3c_m} + \frac{h_{pm}}{c_p} + \frac{2h_m + 0{,}5b_m}{4l}\right) = 4 \cdot \left(\frac{22{,}7}{3 \cdot 23{,}5} + \frac{4{,}7}{13{,}4} + \frac{2 \cdot 22{,}7 + 0{,}5 \cdot 23}{4 \cdot 191}\right) = 2{,}98.$$

7. Полная реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = x_{ad} + x_{fs} = 0{,}65 + 0{,}139 = 0{,}789.$$

8. Единица тока возбуждения

$$i_{f\delta} = 965a \quad (i_{f\delta} = 0{,}91 i_{f_0});$$

$$i_{f\,(1)} = i_{f\delta} x_{ad} = 965 \cdot 0{,}65 = 626\ a\ (i_{f\,(1)} = 0{,}59 i_{f_0}).$$

9. Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_f = \frac{1}{8}\rho_{75}\left(\frac{4}{\pi}k_d\right)^2 \frac{l_{wf}}{w_f q_f} \frac{F_{1N}}{f\Phi_N} =$$

$$= \frac{1}{8} \cdot 2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot 0{,}84\right)^2 \cdot \frac{530{,}4}{14 \cdot 6{,}9} \cdot \frac{10\,480}{50 \cdot 0{,}484} = 0{,}00062$$



или иначе

$$r_f = \frac{i_{f\,(1)}^2}{P_N} r_{f\,(75)}\,(ом) = \frac{626^2}{90\,000 \cdot 10^3} \cdot 0{,}141 = 0{,}00062.$$

10. Реактивность взаимоиндукции демпферной обмотки в продольной оси

$$x_{md} \approx x_{ad} = 0{,}65.$$

11. Реактивность рассеяния демпферной обмотки в продольной оси

$$x_{kd} = \frac{\mu_0 l_i \lambda_{kd} F_{1N}}{\Phi_N} = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 175{,}5 \cdot 2{,}5 \cdot 10\,480}{0{,}484} = 0{,}12.$$

Пазовая проводимость (стержни круглые)

$$\lambda_{kdп} = 0{,}623 + \frac{h_{ок}}{b_{ок}} = 1{,}623.$$

Проводимость рассеяния лобовой части

$$\lambda_{kdл} = 0{,}06\frac{\tau}{l_i} n_c = 0{,}06 \cdot \frac{48}{175{,}5} \cdot 5 = 0{,}082.$$

Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{kd\delta} = \frac{t_к}{12\delta'} = \frac{7}{12 \cdot 2{,}06} = 0{,}283;$$

$$\lambda_{kd} = \frac{2\pi}{n_c}(\lambda_{kdп} + \lambda_{kdл} + \lambda_{kd\delta}) = \frac{2\pi}{5}(1{,}623 + 0{,}082 + 0{,}283) = 2{,}5.$$

12. Реактивность клетки в поперечной оси

$$x_{kq} \approx 0{,}75 x_{kd} = 0{,}09,$$

так как обмотка имеет междуполюсные соединения.

13. Активные сопротивления демпферной обмотки в продольной оси

$$r_{kd} = \left(\frac{\rho_c l_{kd}}{q_c n_c} + \frac{\rho_л l_{лk}}{q_{лк}}\right)\frac{F_{1N}}{f\Phi_N} = \left(\frac{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 198}{2{,}83 \cdot 5} + \frac{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}11}{7{,}5}\right) \times \frac{10\,480}{50 \cdot 0{,}484} = 0{,}0136,$$

где

$$l_{лk} = \frac{0{,}2D}{p} = \frac{0{,}2 \cdot 1\,100}{36} = 6{,}11\ см;$$

$$l_{kd} = l + 2l_в = 191 + 2 \cdot 3{,}4 = 198\ см.$$

$l_в \approx 0{,}07\tau = 3{,}4$ *см* берется конструктивно.

14. Активное сопротивление демпферной обмотки в поперечной оси

$$r_{кq} = \left(\frac{\rho_c l_{kd}}{q_c n_c} + \frac{2 l_{лk} \rho_л}{q_{лk}}\right)\frac{F_{1N}}{f\Phi_N} = \left(\frac{2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 198}{2{,}83 \cdot 5} + \frac{2 \cdot 6{,}11 \cdot 1{,}75 \cdot 10^{-6}}{7{,}5}\right) \cdot \frac{10\,480}{50 \cdot 0{,}484} = 0{,}0144.$$

15. Реактивность нулевого следования фаз.

Проводимость пазового рассеяния на один паз

$$\lambda_{по} = \frac{1}{b_п}\left[(3y - 2)h_3 + (9y - 5)\frac{h_1}{12} - (9y - 8)\frac{h_2}{12}\right] =$$

$$= \frac{1}{2{,}75} \cdot \left[(3 \cdot 0{,}815 - 2) \cdot 1{,}5 + (9 \cdot 0{,}815 - 5) \cdot \frac{13{,}9}{12} - (9 \cdot 0{,}815 - 8) \times \frac{1{,}61}{12}\right] = 1{,}26,$$

где $h_3 = h_{кл} + \Delta = 1,5$ *см* для открытых пазов:

$h_2' = 1,61$ *см* — толщина изоляции между медью верхнего и нижнего слоя;

$y = 0,815$ — шаг обмотки в долях диаметрального шага;

$$\lambda_{ло} = 0,2\lambda_л = 0,2 \cdot 0,256 = 0,0512;$$

$$x_0 = \frac{2\pi\mu_0 l_i F_{1N}}{k_w^2 \Phi_N}\left(\frac{\lambda_{по} + \lambda_{по}}{mq}\right) + x_{\delta 0} =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 175,5 \cdot 10\,480}{0,915^2 \cdot 0,484} \cdot \left(\frac{1,26 + 0,051}{6,75}\right) + 0,026 = \mathbf{0,095},$$

где

$$x_{\delta 0} = \frac{4x_{ad}k_0}{k_d k_w^2}\left(y - \frac{2}{3}\right)\left[\left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2 + \frac{1}{27} + \frac{7}{18}\left(y - \frac{2}{3}\right) - \left(y - \frac{2}{3}\right)^2\right] =$$

$$= \frac{4 \cdot 0,65 \cdot 0,5}{0,84 \cdot 0,915^2}(0,815 - 0,667)\left[\left(\frac{72}{486}\right)^2 + 0,037 + 0,389 \cdot 0,149 - 0,149^2\right] = \mathbf{0,0262}.$$

16. Переходная реактивность в продольной оси

$$x_d' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}}} = 0,149 + \frac{1}{\frac{1}{0,65} + \frac{1}{0,139}} = 0,149 + 0,116 = \mathbf{0,265}.$$

17. Сверхпереходная реактивность в продольной оси

$$x_d'' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{hd}}} = 0,149\ \frac{1}{\frac{1}{0,65} + \frac{1}{0,139} + \frac{1}{0,12}} = \mathbf{0,207}.$$

18. То же в поперечной оси

$$x_q'' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{hq}}} = 0,149 + \frac{1}{\frac{1}{0,396} + \frac{1}{0,09}} = \mathbf{0,222}.$$

19. Реактивность обратного следования фаз

$$x_2 = \frac{x_q'' + x_d''}{2} = \frac{0,222 + 0,207}{2} = 0,214$$

или

$$x_2 = \sqrt{x_q'' x_d''} = \sqrt{0,207 \cdot 0,222} = 0,215.$$

20. Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутом **статоре** и демпферной обмотке

$$T_0 = \frac{x_f}{r_f} = \frac{0,789}{0,00062} = 1270\ \textit{радиан} = \mathbf{4,05\ сек.}$$

21. Постоянная времени переходных токов

$$T_d' = T_0\frac{x_d'}{x_d} = 1270 \cdot \frac{0,265}{0,799} = 420\ \textit{радиан} = 1,34\ сек.$$

22. Постоянная времени сверхпереходных токов

$$T_d'' = T_{1d}'\frac{x_d''}{x_d'} = 17,3 \cdot \frac{0,207}{0,264} = 13,5\ \textit{радиан} = 0,0425\ сек.,$$

где

$$T_{1d}' = \frac{x_{1d}'}{r_{hd}} = \frac{0,235}{0,0136} = 17,3\ \textit{радиан};$$

$$x_{1d}' = x_{hd} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}}} = 0,235.$$



23. Постоянная времени асимметричного тока в статоре

$$T_a = \frac{x_2}{r_1} = \frac{0,215}{0,0029} = 74\ \textit{радиана} = 0,236\ сек.$$

24. Первый пик тока внезапного короткого замыкания

$$Ik_{\max} \approx 1,8\frac{1}{x_d''} = 1,8 \cdot \frac{1}{0,207} = 8,7$$

или

$$\sqrt{2}I_n \cdot 8,7 = \sqrt{2} \cdot 3\,765 \cdot 8,7 = 46\,400\ a.$$

## XXIII. Механический расчет

1. Выбор вала по условиям прочности на скручивание

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{kM_N \cdot 16}{\pi\tau_{\max}}} = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 97 \cdot 10^6 \cdot 16}{\pi \cdot 600}} = 107,4\ \textit{см}.$$

Номинальный момент с учетом возможности перегрузки на 15%:

$$M_N = 97\,500\frac{1,15\ P_N\ (квт)}{n\ (об/мин)} = 97\,500\frac{1,15 \cdot 90\,000 \cdot 0,8}{83,3} = 97 \cdot 10^6\ \textit{кгсм};$$

$$\tau_{\max} = 600\ \textit{кг/см}^2.$$

Коэффициент временной перегрузки $k$ принимаем равным 1,5. Выбираем вал диаметром $D_0 = 110$ *см* с внутренним отверстием $d_0 = 40$ *см*.

Момент сопротивления кручению

$$W = \frac{\pi}{16}\left(\frac{D_0^4 - d_0^4}{D_0}\right) = \frac{\pi}{16}\left(\frac{110^4 - 40^4}{110}\right) = 25,8 \cdot 10^4\ \textit{см}^3.$$

Напряжение кручения в сечении вала

$$\tau = \frac{kM_N}{W} = \frac{1,5 \cdot 97 \cdot 10^6}{25,8 \cdot 10^4} = 564\ \textit{кг/см}^2.$$

2. Вес меди на полюс

$$g_{Cu}' = \frac{G_{Cuf} + G_{Cukd}}{2p} = \frac{28,8 + 1,98}{72} \cdot 10^3 = 426\ \textit{кг}.$$

Вес полюса (примерный) по чертежу

$$G_{Fe}' \approx 1020\ \textit{кг}.$$

Полный вес полюса с обмоткой

$$G_п' = 1446\ \textit{кг}.$$

Центробежная сила полюса с обмоткой

$$P_{\omega p} = \frac{G_п'}{981}(2\pi n_{\max})^2 R_p.$$

Максимальная угонная скорость $n_{\max} \approx 2n_N$ об/сек. Радиус по центру тяжести полюса

$$R_p = \frac{D - (h_m + h_p)}{2} = \frac{1100 - (22,7 + 5)}{2} = 536\ \textit{см},$$

тогда

$$P_{\omega p} = \frac{1446}{981}\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \cdot (2 \cdot 83,3)^2 \cdot 536 = 245 \cdot 10^3\ \textit{кг}.$$

Усилие на погонный сантиметр ласточкина хвоста

$$q = \frac{P_{\omega p}}{l} = \frac{245 \cdot 10^3}{191} = 1280\ \textit{кг/см}.$$

Согласно нормам можно поставить один хвост.

3. Растягивающая сила в поперечном сечении обода ротора от веса полюсов

$$C_p = \frac{pP_{\omega p}}{\pi} = \frac{36\cdot 245\cdot 10^3}{\pi} = 2810\cdot 10^3 \ кг.$$

4. Исходя из существующих конструкций, выбираем рабочую толщину обода ротора или высоту ярма $h'_{j2} = 41{,}5$ *см* и проверяем на прочность. Высота хвоста — 90 *мм*. Полная высота ярма ротора с учетом шпилек

$$h_{j2} = 51 \ см.$$

Вес обода, включая хвосты полюсов, клинья, стяжные шпильки (см. стр. 763),

$$G_{j2} = 252\,000 \ кг.$$

Центробежная сила обода ротора

$$P_{\omega j} = \frac{G_{j2}}{981}(2\pi n)_{\max}{}^2 R_i;$$

$$R_i = \frac{D'_{j2} + D_{j2}}{4} = \frac{1041 + 939}{4} = 495 \ см;$$

$$P_{\omega j} = \frac{252\cdot 10^3}{981}\ 4\pi^2 \left(\frac{2\cdot 83{,}3}{60}\right)^2\cdot 495 = 38\,700\cdot 10^3 \ кг.$$

5. Растягивающая сила в ободе от веса обода

$$C_j = \frac{P_{\omega j}}{2\pi} = \frac{38\,700}{2\pi}\cdot 10^3 = 6160\cdot 10^3 \ кг.$$

6. Полное растягивающее усилие на одно сечение обода

$$C = C_p + C_j = 2810\cdot 10^3 + 6160\cdot 10^3 = 8970\cdot 10^3 \ кг.$$

7. Растягивающая сила на одностороннее сечение элементарного обода по [1]

$$C_u = C\frac{u}{N} = 8970\cdot 10^3\cdot \frac{6}{325} = 165\,000 \ кг.$$

Обод — сегментный из 6-миллиметрового железа. На одном сегменте 6 полюсных делений (сдвиг одного сегмента относительно соседнего на одно полюсное деление). В элементарном ободе $u$=6 слоев. Полное число слоев

$$N = 0{,}95\frac{l_{j2}}{\Delta} = 0{,}95\cdot\frac{205}{0{,}6} = 325,$$

где $l_{j2}$ — максимальная ширина обода, принята равной 205 *см*.

8. Растягивающее напряжение в листах обода

$$\sigma_z = \frac{C_u}{(u-1)\,\Delta h_{j2}} = \frac{165\,000}{(6-1)\cdot 0{,}6\cdot 41{,}5} = 1320 \ кг/см^2$$

при допустимом напряжении на растяжение $R_z = 1550$ *кг/см²*.

9. Напряжение на срез в шпильках

$$\sigma_t = \frac{4C_u}{b\,(u-1)\,\pi d^2} = \frac{4\cdot 165\,000}{6\,(6-1)\,\pi\cdot 3{,}2^2} = 686 \ кг/см^2$$

при допустимом напряжении на срез для шпилек

$$R_t = 1200 \ кг/см^2.$$

На полюсное деление приходится $b$=6 шпилек диаметром $d$=32 *мм*.

10. Напряжения смятия в листах без учета усилия прессовки

$$\sigma_d = \frac{\pi d}{4\Delta}\,\sigma_t = \frac{\pi\cdot 3{,}2}{4\cdot 0{,}6}\cdot 686 = 2870 \ кг/см^2$$

при допустимом напряжении смятия $R_c$=3000 *кг/см²*.



11. Вес полюсов и обода

$$G = G_j + G_m = 252 + 72\cdot 1{,}446 = 356 \ т.$$

Квадрат диаметра центра тяжести обода и полюсов

$$D^2 = \frac{G_p}{G}D_p^2 + \frac{G_j}{G}D_j^2 \approx 102{,}4 \ м^2;$$

$$GD^2 = 356\cdot 102{,}4 = 36\,600 \ тм^2$$

с учетом махового момента роторной звезды

$$GD^2 \approx 1{,}1\cdot 36\,600 = 40\,000 \ тм^2 \ (4\cdot 10^7 \ кгм^2).$$

Полученный маховой момент удовлетворяет техническим требованиям на поставку генератора.

12. Постоянная инерции гидрогенератора

$$T_i = \frac{1}{4}\,\frac{GD^2\,\omega_N^2}{P_N} = \frac{1}{4}\cdot\frac{4\cdot 10^7}{9\cdot 10^7}\left(\frac{2\pi\cdot 83{,}3}{60}\right)^2 = 8{,}6 \ сек.$$

13. Проверка вала на критическое число оборотов:

жесткость вала на изгиб

$$k = \frac{48EI}{l_в^3} = \frac{48\cdot 2\cdot 10^6\cdot 7{,}07\cdot 10^6}{1500^3} = 2\cdot 10^5;$$

экваториальный момент инерции сечения полого вала

$$I = \frac{\pi\,(D_0^4 - d_0^4)}{64} = \frac{\pi\cdot(110^4 - 40^4)}{64} = 7{,}07\cdot 10^6 \ см^4;$$

длина вала

$$l_в = 1500 \ см;$$

Вес ротора с валом, звездой и т. д.

$$Q = 500\,000 \ кг.$$

Первая критическая скорость

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{kg}{Q}} = \sqrt{\frac{2\cdot 10^5\cdot 981}{5\cdot 10^5}} = 19{,}8\frac{1}{сек}$$

или

$$n_{кр} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{19{,}8}{2\pi} = 3{,}15 \ об/сек = 189 \ об/мин,$$

т. е. выше угонной скорости $n_{уг} = 166{,}6$ об/мин.

## *Пример 2*

### Расчет синхронного двигателя

I. Проектное задание (§ 12-8)

1. Наименование машины — синхронный двигатель общего назначения.
2. Номинальная мощность на валу $P_{2N}$=560 *квт*.
3. Линейное напряжение $U_{лN}$ = 6000 *в*, соединение фаз — звезда.
4. Частота $f_N$ = 50 *гц*.
5. Коэффициент мощности $\cos\varphi_N$=0,8 (опережающий).
6. Скорость вращения $n_N$ = 600 об/мин.
7. Гарантированный к. п. д. не ниже 92,5%.
8. Статическая перегружаемость не менее 2 $\left(\frac{M_{\max}}{M_N} \geqslant 2\right)$.

9. Пусковой момент $M_п$ не ниже 1,5 $M_N$.

10. Пусковой ток $I_п$ не выше 6,0 $I_N$.

11. Входной момент $M_{вх}$ не ниже 0,8 $M_N$.

12. Конструктивный тип — защищенный с горизонтальным валом, с самовентиляцией и радиальными каналами в статоре.

II. Дополнительные расчеты к проектному заданию

1. Число пар полюсов

$$p = \frac{f}{n} = \frac{50 \cdot 60}{600} = 5.$$

2. К. п. д. может быть задан в технических условиях. Ориентировочная величина к. п. д. может быть определена по методу, указанному в § 12-8.

К. п. д. по основным электромагнитным потерям при $k_э = 1$

$$\eta_э = 1 - k_э \left(\frac{2p}{P_{2N} \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{4}} = 1 - \left(\frac{10}{560 \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{4}} = 1 - 0{,}055 = 0{,}945.$$

Общий к. п. д. с учетом механических и добавочных потерь ($p_{мех} = 1\%$, $p_{доб} = 0{,}4\%$)

$$\eta = 0{,}945 - (0{,}01 + 0{,}004) = 0{,}93 = 93\%.$$

Сравнивая с данными табл. 82 принимаем $\eta = 93\%$.

3. Расчетная мощность машины (принимается за единицу)

$$P_i = \frac{P_{2N}}{\eta \cos \varphi_N} = \frac{560}{0{,}93 \cdot 0{,}8} = 750 \text{ ква}.$$

4. Номинальный фазный ток статора (принимается за единицу)

$$I_N = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot U_{лN}} = \frac{750 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 72{,}2 \text{ а}.$$

III. Ориентировочный выбор основных размеров (§ 12-9)

*Первый метод.*

1. Коэффициент $\beta = \frac{\tau}{l_i}$ (по рис. 262) принимаем равным 1,2.

2. Универсальную электромашинную постоянную $C_s$ принимаем по табл. 79. Для напряжения $U_{лN} = 6000$ *в* величина $C_s = 3{,}7$ $см \cdot дж.^{-\frac{1}{4}}$.

3. Определяем коэффициент глубины паза $\lambda_1 = 0{,}185$, рис. 261.

4. Полюсное деление статора

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P_i \beta}{2pf \sqrt{2} \lambda_1}} = 3{,}7 \sqrt[4]{\frac{750 \cdot 10^3 \cdot 1{,}2}{10 \cdot 50 \cdot \sqrt{2} \cdot 0{,}185}} = 34{,}6 \text{ см}.$$

5. Диаметр расточки статора

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{10 \cdot 34{,}6}{\pi} = 110 \text{ см}.$$

6. Расчетная длина статора (ориентировочная)

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{34{,}6}{1{,}2} = 28{,}8 \text{ см}.$$

*Второй метод.*

7. Находим машинную постоянную Арнольда $C_A$ по рис. 263 или по уравнению $C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_w A B_\delta}$, выбирая $A$ и $B_{\delta_1}$ по кривым рис. 264 и 265. Принимаем $C_A = 4$ $см^3 \cdot дж^{-1}$.



8. Диаметр расточки статора при выбранной величине $\beta = 1{,}2$

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_i \beta 2p}{\pi n} C_A} = \sqrt[3]{\frac{750 \cdot 10^3 \cdot 1{,}2 \cdot 10 \cdot 60}{\pi \cdot 600} 4} = 104 \text{ см}.$$

Принимаем $D = 110$ **см.**

IV. Внешний диаметр и размеры паза статора (§ 12-9, 12-10)

1. Ориентировочно

$$D_{j1} = D\left[1 + \frac{(1 \div 1{,}2)\pi}{2p}\right] = 110\left[1 + \frac{(1 \div 1{,}2)\pi}{10}\right] = (138 \div 152) \text{ см}.$$

Близкий диаметр по нормалям (приложение I) $D_{j1} = 140$ *см.*

2. Высота паза (ориентировочно) при принятой величине коэффициента паза $\lambda_1$

$$h_п = \tau\lambda_1 = 34{,}6 \cdot 0{,}185 = 6{,}45 \text{ см}.$$

3. Ширина паза статора (ориентировочно):

а) по данным практики для заданной мощности двигателя отношение

$$\lambda_2 = \frac{h_п}{b_п} = 4 \div 5{,}5; \text{ принимаем } \lambda_2 = 5, \text{ тогда}$$

$$b_п = \frac{h_п}{\lambda_2} = \frac{6{,}45}{5} = 1{,}3 \text{ см};$$

б) по допустимому перепаду температуры по толщине изоляции

$$b_п = \frac{2k_i\theta_i}{s^2 \rho_{75} \varphi_{Cu} \Delta_i} = \frac{2 \cdot 0{,}0015 \cdot 20}{550^2 \cdot 2{,}17 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}3} = 1{,}2 \text{ см},$$

где $\theta_i = 20°C$ — допустимый перепад температуры по толщине для компаундированной изоляции;

$k_i = 0{,}0015$ *вт/°С·см* — коэффициент теплопроводности компаундированной изоляции;

$\Delta_i = 0{,}3$ *см* — односторонняя толщина изоляции при $U_{лN} = 6000$ *в* (приложение V);

$s = 550$ *а/см²* — принято согласно рис. 266;

$\rho_{75} = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *ом см.*

Принимаем $b_п = 1{,}2$ *см.*

V. Число витков на фазу и сечение меди статора (§ 12-10, 12-11)

1. Индукция в воздушном зазоре по рис. 265

$$B_{\delta_1} = 0{,}84 \cdot 10^{-4} \text{ вб/см}^2.$$

2. Магнитный поток на полюс

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_{\delta_1} \tau l_i = \frac{2}{\pi} \cdot 0{,}84 \cdot 10^{-4} \cdot 34{,}6 \cdot 28{,}8 = 0{,}0535 \text{ вб}.$$

2. Число витков на фазу

$$w_1 = \frac{U_{лN}}{\sqrt{3}\pi\sqrt{2} f k_w \Phi_1} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}0535} = 318,$$

где $k_w = 0{,}92$ — принят предварительно.

4. Сечение фазного проводника статора

$$q_ф = \frac{I_N}{s} = \frac{72,2}{550} = 0,131 \text{ см}^2 = 13,1 \text{ мм}^2.$$

При таком сечении выгодно выбрать одну параллельную ветвь: $a = 1$.

## VI. Число пазов статора

1. Зубцовый шаг статора по расточке (ориентировочно)

$$t_1 = \frac{b_п}{\lambda} = \frac{1,2}{0,4} = 3 \text{ см},$$

где $\lambda = 0,4$ — принимаем согласно § 12-10.

2. Число пазов статора (ориентировочно)

$$Z_1 = \frac{\pi D}{t_1} = \frac{3,14 \cdot 110}{3} = 115.$$

3. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{6p} = \frac{115}{6 \cdot 5} = 3\frac{5}{6} = \frac{23}{6}.$$

Такая дробность не подходит, так как по условию выполнимости обмотки знаменатель дробности должен быть кратным числу пар полюсов и $\frac{Z_1}{3}$ = ц.ч. Потому принимаем $q = 3\frac{3}{5}$ и $Z_1 = 6pq = 108$.

4. Число активных проводников в пазу статора

$$s'_п = \frac{w_1 a}{pq} = \frac{318}{5 \cdot \frac{18}{5}} = 17,7.$$

Приняв $s'_п = 18$, окончательно получим

$$w_1 = \frac{s'_п}{a} pq = 18 \cdot 5 \cdot \frac{18}{5} = 324.$$

5. Так как внешний диаметр статора $D_{j1} = 140$ см $> 99$ см, то статорное железо шихтуется из отдельных сегментов; статор неразъемный. Число пазов в сегменте (кратное 3) принимаем $n_z = 9$.

Число сегментов по окружности статора

$$n_{сег} = \frac{Z_1}{n_z} = \frac{108}{9} = 12.$$

Длина большой хорды сегмента

$$l_{c_1} = D_{j1} \sin\left(\frac{\pi}{n_{сег}}\right) = 140 \sin 15° = 36,23 \text{ см}.$$

Длина малой хорды сегмента

$$l_{c_2} = D \sin 15° = 110 \sin 15° = 28,47 \text{ см}.$$

Сегменты (см. эскиз сегмента, рис. 283 и раскроя листа рис. 284) штампуются из листов электротехнической стали размерами 75×150 см по 18 сегментов из листа. Количество сегментов на весь статор при толщине листа $\Delta = 0,5$ мм

$$\frac{l_{Fe}}{\Delta} n_{сег} = \frac{22,3}{0,05} 12 = 5352,$$

где $l_{Fe} = 22,3$ см (см. ниже).

Всего 298 листов стали на статор.



6. Составляем схему обмотки и определяем числовой ряд. Для $q = b + \frac{c}{d} = 3 + \frac{3}{5}$ в числовом ряду будет $d - c = 2$ малых группы и $c = 3$ больших группы. В малой группе $b = 3$ паза, в большой группе $b + 1 = 4$ паза. Числовой ряд 3, 3, 4, 4, 4 . . .

7. Полюсное деление статора в пазах

$$\tau_п = mq = 3 \cdot 3\frac{3}{5} = 10\frac{4}{5} = \frac{54}{5}.$$

8. Обмотка двухслойная с укороченным шагом. Шаг обмотки по пазам $y_п = 9$ (из 1-го паза в 10-й). Относительный шаг обмотки

$$y = \frac{y_п}{\tau_п} = \frac{9 \cdot 5}{54} = 0,832.$$

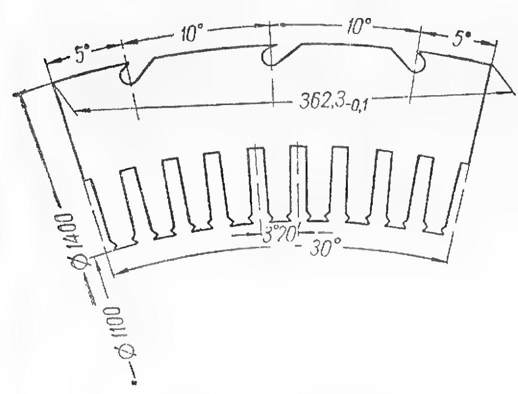



Рис. 283. Сегмент статора.

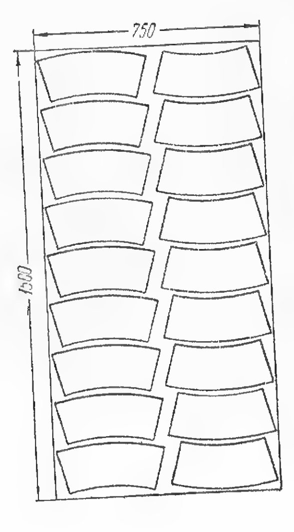



Рис. 284. Раскрой листа электротехнической стали.

9. Обмоточный коэффициент

$$k_{w1} = k_{y1} k_{p1} = 0,966 \cdot 0,925 = 0,895,$$

где

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) = \sin(90° \cdot 0,832) = 0,966,$$

$$k_{p1} = \frac{\sin\frac{\pi}{2m}}{N \sin\frac{\pi}{2mN}} = \frac{0,5}{18 \sin\frac{180°}{6 \cdot 18}} = 0,925,$$

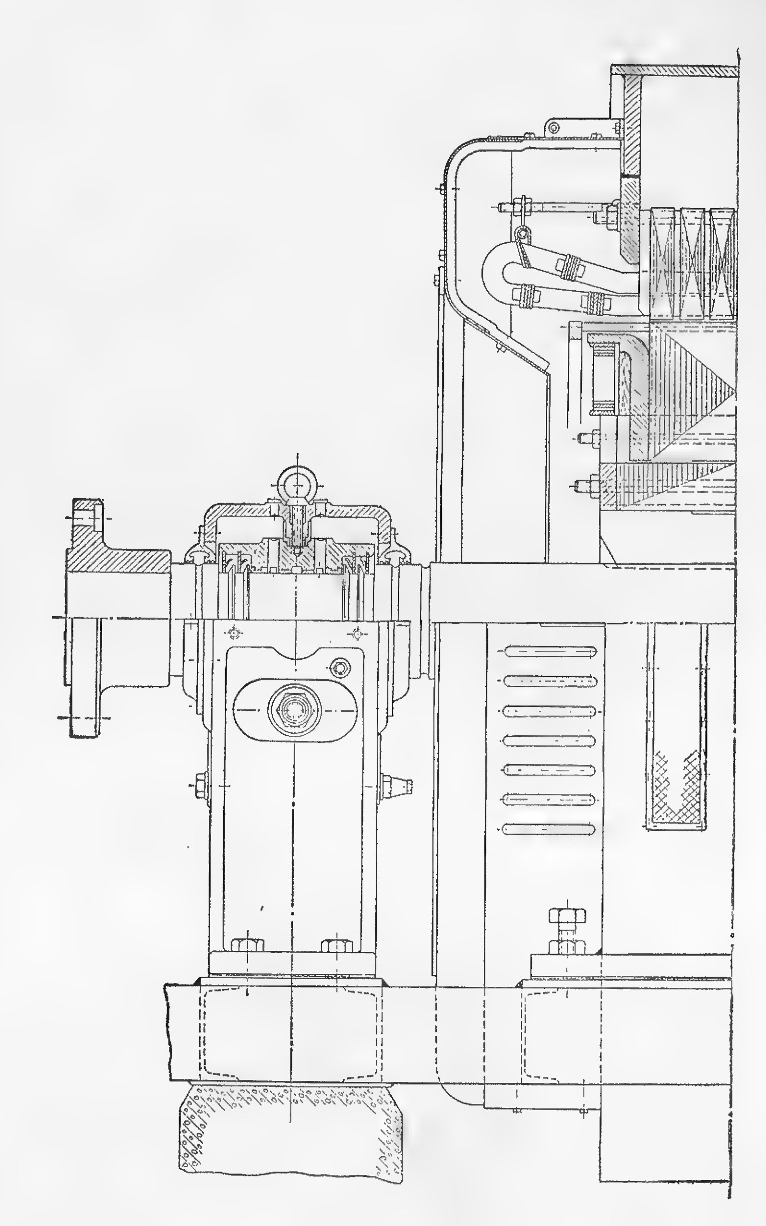
$$N = bd + c = 18.$$

На рис. 285 приведен продольный разрез рассчитываемого двигателя.

## VII. Окончательный выбор обмотки и размеров пазов и зубцов статора и уточнение расчетных величин (§ 12-13)

Выбираем двухслойную обмотку с укороченным шагом, изоляция обмотки статора непрерывная компаундированная класса *A*.

1. Число витков на фазу $w_1 = 324$.
2. Число активных проводников в пазу $s'_п = 18$.



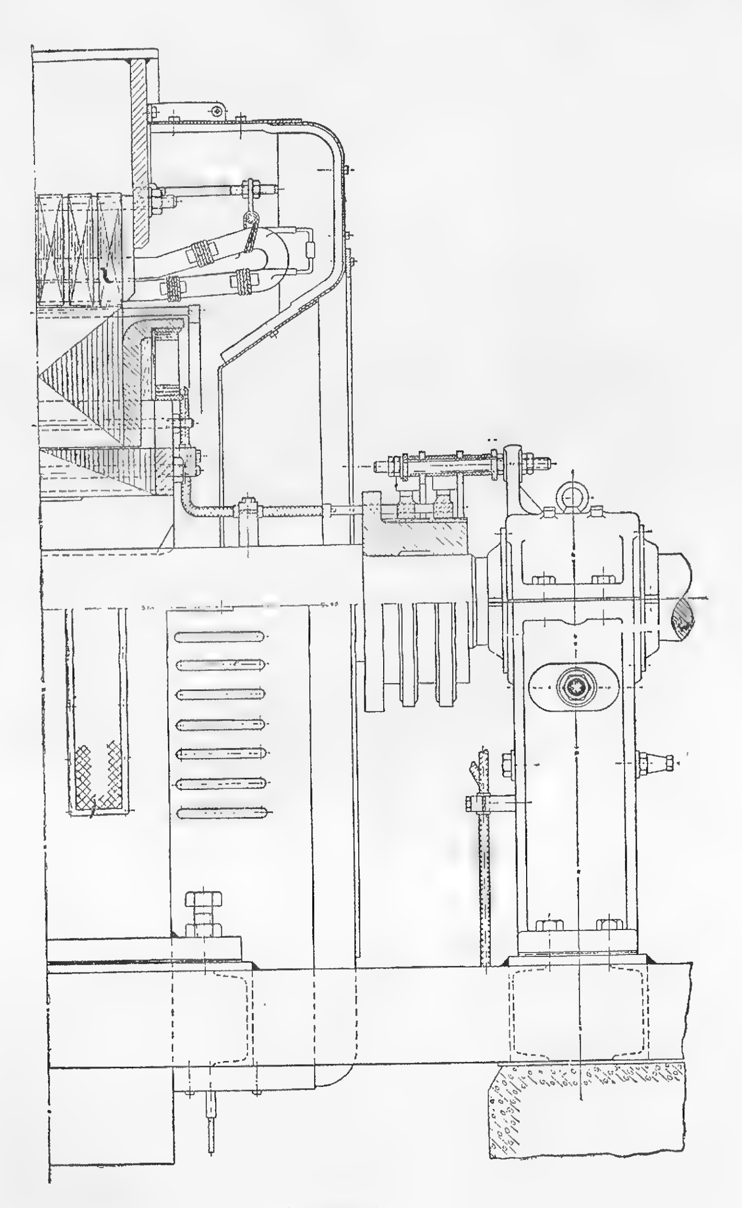


Рис. 285. Синхронный двигатель 560 *квт*, 6000 *в*, 600 об/мин (продольный разрез).

3. Выбираем прямоугольный проводник марки ПБД по сортаменту. Размеры проводника голого 6,9 × 1,95 *мм*, изолированного $a' \times b' = 7{,}17 \times 2{,}22$ *мм*.

Сечение фазного проводника $q_ф = 0{,}133$ *см*² при $a = 1$.

4. Составляем спецификацию паза статора (рис. 286):

| | Наименование | Размеры паза по ширине (в *мм*) | Размеры паза по высоте (в *мм*) |
|---|---|---|---|
| 1. | Провод марки ПБД | 7,17 | 18×2,22 = 40 |
| 2. | Прокладка из миканита № 06250 | — | 0,2×14 = 2,80 |
| 3. | Микафолий № 06432 толщиной 0,25 *мм* 9,5 слоев (вполнахлеста) | 4,75 | 9,50 |
| 4. | Летероид № 06130 толщ. 0,15 *мм* один слой | 0,30 | 0,60 |
| 5. | Прокладка из электрокартона ЭВ № 06740 толщиной 1,7 *мм* | — | 1,70 |
| 6. | Прокладка из электрокартона ЭВ № 06740 толщиной 0,5 *мм* | — | 0,50 |
| 7. | Прокладка под клин из электрокартона ЭВ № 06740 толщиной 0,5 *мм* | — | 0,50 |
| 8. | Клин гетинаксовый | — | 5,00 |
| 9. | Надклиновая часть | — | 0,55 |
| 10. | Зазор | 0,28 | 0,30 |
| 11. | Компаунд | 0,20 | 1,00 |
| | Всего | 12,7 *мм* | 62 *мм* |

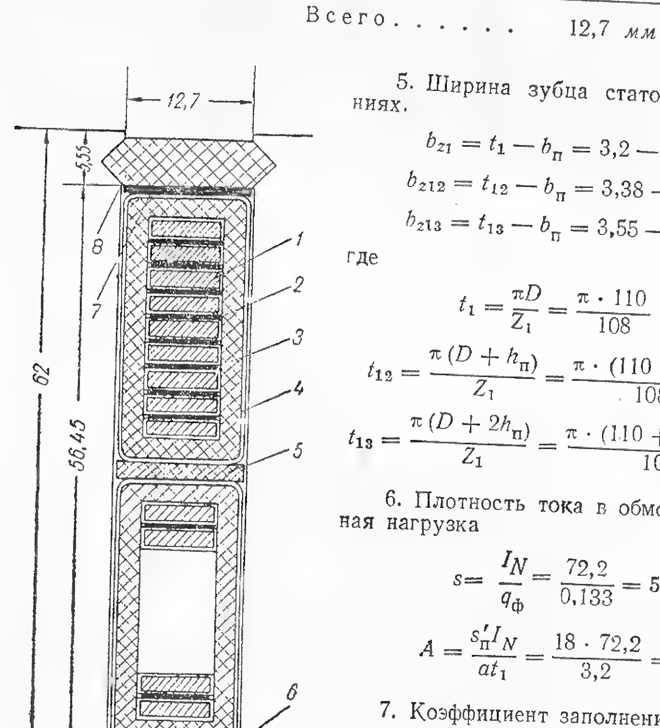



Рис. 286. Паз статора.

5. Ширина зубца статора в различных сечениях.

$$b_{z1} = t_1 - b_п = 3{,}2 - 1{,}27 = 1{,}93 \text{ см};$$

$$b_{z12} = t_{12} - b_п = 3{,}38 - 1{,}27 = 2{,}11 \text{ см};$$

$$b_{z13} = t_{13} - b_п = 3{,}55 - 1{,}27 = 2{,}28 \text{ см},$$

где

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 110}{108} = 3{,}2 \text{ см};$$

$$t_{12} = \frac{\pi (D + h_п)}{Z_1} = \frac{\pi \cdot (110 + 6{,}2)}{108} = 3{,}38 \text{ см};$$

$$t_{13} = \frac{\pi (D + 2h_п)}{Z_1} = \frac{\pi \cdot (110 + 2 \cdot 6{,}2)}{108} = 3{,}55 \text{ см}.$$

6. Плотность тока в обмотке статора и линейная нагрузка

$$s = \frac{I_N}{q_ф} = \frac{72{,}2}{0{,}133} = 542 \ a/см^2;$$

$$A = \frac{s'_п I_N}{a t_1} = \frac{18 \cdot 72{,}2}{3{,}2} = 405 \ a/см.$$

7. Коэффициент заполнения паза медью

$$\varphi_{Cu} = \frac{q_ф s'_п}{a h_п b_п} = \frac{0{,}133 \cdot 18}{6{,}2 \cdot 1{,}27} = 0{,}304.$$



## VIII. Точные значения номинального потока, длин железа и числа пакетов (§ 12-14)

1. Магнитный поток

$$\Phi_1 = \frac{U_{лN}}{\sqrt{3}\,\pi \sqrt{2}\, f k_w w_1} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0{,}895 \cdot 324} = 0{,}0541 \ вб.$$

2. Число вентиляционных каналов при длине пакета $l' = 4$ *см* и ширине канала $b_s = 1$ *см*

$$n_s = \frac{l_i - l'}{0{,}5\, b_s + l'} = \frac{28{,}8 - 4}{0{,}5 + 4} = 5{,}5.$$

Принимаем $n_s = 5$.

3. Полная длина статора

$$l = l'(n_s + 1) + n_s b_s = 4 \cdot (5 + 1) + 5 = 29 \text{ см}.$$

4. Длина чистого железа

$$l_{Fe} = l'(n_s + 1)\, k_п = 4 \cdot (5 + 1) \cdot 0{,}93 = 22{,}3 \text{ см},$$

где $k_п = 0{,}93$ — коэффициент заполнения пакета при толщине листа 0,5 *мм* и лаковой изоляции.

5. Уточняем расчетную длину статора

$$l_i = l'(n_s + 1) + 0{,}5 n_s b_s = 4 \cdot (5 + 1) + 0{,}5 \cdot 5 = 26{,}5 \text{ см}.$$

6. Основная гармоническая индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi_1}{\frac{2}{\pi} \tau l_i} = \frac{0{,}0541}{\frac{2}{\pi} \cdot 34{,}6 \cdot 26{,}5} = 0{,}925 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2.$$

7. Средняя индукция в зубцах

$$B_{z12} = B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{z12} l_{Fe}} = 0{,}925 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3{,}2 \cdot 26{,}5}{2{,}11 \cdot 22{,}3} = 1{,}68 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2.$$

Так как индукция $B_{z12} < 2 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*², то размеры пазов и длину железа принимаем окончательными.

8. Уточнение рассчетных коэффициентов и машинной постоянной.

Коэффициент

$$\beta = \frac{\tau}{l_i} = \frac{34{,}6}{26{,}5} = 1{,}3;$$

был принят $\beta = 1{,}2$.

Коэффициент глубины паза

$$\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau} = \frac{6{,}2}{34{,}6} = 0{,}179.$$

Универсальная машинная постоянная

$$C_s = \frac{\tau}{\sqrt[4]{\frac{P_i \beta}{2pf\sqrt{2}\lambda_1}}} = \frac{34{,}6}{\sqrt[4]{\frac{750 \cdot 1{,}3 \cdot 10^3}{10 \cdot 50 \cdot \sqrt{2} \cdot 0{,}179}}} = 3{,}68 \ см \cdot дж^{-1/4}.$$

## IX. Высота ярма статора и индукция в ярме (§ 12-9)

1. Высота ярма статора

$$h_{j1} = \frac{D_{j1} - D}{2} - h_п = \frac{140 - 110}{2} - 6{,}2 = 8{,}8 \text{ см}.$$

2. Индукция в ярме статора

$$B_{j1} = \frac{\Phi_1}{2 h_{j1} l_{Fe}} = \frac{0{,}0541}{2 \cdot 8{,}8 \cdot 22{,}3} = 1{,}37 \cdot 10^{-4} \ вб/см^2.$$

Так как $B_{j1} = 1{,}37 \cdot 10^{-4} < 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*², то высоту ярма принимаем окончательно.

## X. Вес зубцов, ярма меди, изоляции статора. Ориентировочное определение потерь в железе и меди (§ 12-15)

1. Вес зубцов

$$G_z = Z_1 b_{z1/2} l_{Fe} h_п \gamma_{Fe} = 108 \cdot 2{,}11 \cdot 22{,}3 \cdot 6{,}2 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 264\ кг.$$

2. Вес ярма

$$G_{j1} = \frac{\pi}{4}\left[D_{j1}^2 - (D_{j1} - 2h_{j1})^2\right] l_{Fe}\gamma_{Fe} = \frac{\pi}{4}\left[140^2 - (140 - 2 \cdot 8{,}8)^2\right] \times$$
$$\times\ 22{,}3 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 666\ кг.$$

3. Полный вес железа

$$G_{Fe} = G_z + G_{j1} = 264 + 666 = 930\ кг.$$

4. Потери в железе статора

$$p_{Fe} = p_{10}\left[k_z (B_{z1/2}\ вб/м^2)^2 G_z + k_j (B_{j1}\ вб/м^2)^2 G_{j1}\right] =$$
$$= 2{,}5 \cdot [1{,}7 \cdot 1{,}68^2 \cdot 264 + 1{,}3 \cdot 1{,}37^2 \cdot 666] = 7550\ вт\ (7{,}55\ квт),$$

где $p_{10} = 2{,}5$ *вт/кг* — удельные потери для листовой стали Э21
при $B = 1{,}0$ *вб/м²*;
$k_z = 1{,}7$; $k_j = 1{,}3$.

5. Средняя длина лобовой части обмотки статора (по приложению VI)

$$l_л = \frac{\pi (D + h_п) y}{2p\sqrt{1 - \left(\frac{b_п + s_i}{t_1}\right)^2}} + \pi\left(R_1 + \frac{h_п}{4}\right) + 2A =$$
$$= \frac{\pi (110 + 6{,}2) \cdot 0{,}832}{10 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1{,}27 + 0{,}5}{3{,}2}\right)^2}} + \pi\left(1{,}5 + \frac{6{,}2}{4}\right) + 2 \cdot 5{,}5 = 57\ \textbf{см}.$$

6. Средняя длина витка обмотки статора

$$l_{w1} = 2(l + l_л) = 2 \cdot (29 + 57) = 172\ см.$$

7. Омическое сопротивление обмотки статора

$$r_{1\,(15)} = \rho_{(15)}\frac{l_{w1} w_1}{q_ф} = 1{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{172 \cdot 324}{0{,}133} = \mathbf{0{,}735}\ \textbf{ом};$$
$$r_{1\,(75)} = 1{,}24 r_{1\,(15)} = 1{,}24 \cdot 0{,}735 = \mathbf{0{,}91}\ \textbf{ом}.$$

8. Потери в меди (ориентировочно)

$$p_{Cu1} = 3 I_N^2 k_r r_{1\,(15)} = 3 \cdot 72{,}2^2 \cdot 1{,}03 \cdot 0{,}91 = 14\,600\ вт = 14{,}6\ квт,$$

где $k_r = 1{,}03$ — принят ориентировочно (определение $k_r$ — см. ниже).

9. Вес меди статора

$$G_{Cu} = m w_1 l_{w1} q_ф \gamma_{Cu} = 3 \cdot 324 \cdot 172 \cdot 0{,}133 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 198\ кг.$$

10. Вес изоляции обмотки статора

$$G_i = 0{,}5\,\gamma_i Z_1 \Pi \frac{\Delta_п}{2} l_{w1} = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 108 \cdot 13{,}94 \cdot \frac{0{,}57}{2} \cdot 172 = 74\ \textbf{кг},$$

где $\Pi = 2(b_п + h_п - h_{кл}) = 2 \cdot (1{,}27 + 6{,}2 - 0{,}5) = 13{,}94$ *см*;
$\gamma_i = 2 \cdot 10^{-3}$ *кг/см³*; $Z_1 = 108$; $\Delta_п = 0{,}57$ *см*; $l_{w1} = 172$ *см*.



## XI. Проверка статора на нагрев (§ 12-16)

1. Тепловой поток от потерь в активной части статора, отнесенный к единице поверхности расточки статора,

$$w_a = \frac{p_{Fe} + p_{Cu}\frac{2l}{l_{w1}}}{\pi D l} = \frac{7550 + 14\,600\,\frac{2 \cdot 29}{172}}{\pi \cdot 110 \cdot 29} = 1{,}25\ вт/см^2.$$

2. Коэффициент теплоотдачи от железа статора (гл. 6)

$$\alpha_{Fe} = (7 \div 9)\,\tau \cdot 10^{-4}\quad или\quad \alpha_{Fe} = 8 \cdot 10^{-3}(1 + 0{,}1v)\ вт/°C\,см^2,$$

где $v$ — окружная скорость ротора

$$v = \pi D n = \pi \cdot 110 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{600}{60} = 34{,}6\ м/сек.$$

Принимаем

$$\alpha_{Fe} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0{,}1 \cdot 34{,}6) = 0{,}0357\ вт/°C\ см^2.$$

3. Средний перегрев железа статора над охлаждающим воздухом

$$\theta_{Fe} = \frac{w_a}{\alpha_{Fe}} = \frac{1{,}25}{0{,}0357} = 35°C.$$

4. Перепад температуры по толщине изоляции

$$\theta_i = \frac{2p_{Cu1}\Delta_i}{Z_1 l_{w1} 2(h_п + b_п) k_i} = \frac{2 \cdot 14\,600 \cdot 0{,}285}{108 \cdot 172 \cdot 2 \cdot (6{,}2 + 1{,}27) \cdot 0{,}0015} = 20°C,$$

где $\Delta_i = 0{,}285$ *см* — односторонняя толщина изоляции в пазу с учетом зазора.

5. Перегрев меди статора над охлаждающим воздухом

$$\theta_{Cu1} = \theta_{Fe} + \theta_i + \theta_a = 35 + 20 + 10 = 65°C,$$

где

$$\theta_a = \frac{1}{2}\,\frac{\Sigma p}{1{,}1 V_a};$$

принимаем $\theta_a = 10°C$.

Перегрев меди статора является предельным для изоляции класса А. Поэтому требуется уточнение теплового расчета.

## XII. Воздушный зазор (§ 12—17)

1. Приведенный воздушный зазор машины

$$\delta' = \mu_0\frac{k_d F_{1N}}{B_{\delta 1} x_{ad}} = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}85 \cdot 5650}{0{,}925 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}8} = 0{,}84\ см,$$

где $k_d = 0{,}85$ определяется по рис. 267;

$$F_{1N} = \frac{1}{p} \cdot 1{,}35 w_1 k_w I_N = \frac{1}{5} \cdot 1{,}35 \cdot 324 \cdot 0{,}895 \cdot 72{,}2 = 5650\ a$$ — номинальная м. д. с. реакции якоря на полюс.

Реактивность $x_{ad}$ определяем по заданной величине максимального момента

$$x_{ad} \approx \frac{\sin\varphi_N}{M_{max}^2 - 1} + \sqrt{\left(\frac{\sin\varphi_N}{M_{max}^2 - 1}\right)^2 + \frac{1}{M_{max}^2 - 1}} = \frac{0{,}6}{3} +$$
$$+ \sqrt{\left(\frac{0{,}6}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}} \approx 0{,}8$$

при $\cos\varphi_N = 0{,}8$, $\sin\varphi_N = 0{,}6$ и $M_{max} = 2$.

2. Действительный воздушный зазор

$$\delta = \frac{\delta'}{k_C} = \frac{0{,}84}{1{,}2} = \mathbf{0{,}7}\ \textit{см},$$

где $k_C = 1{,}2$ принят ориентировочно.

3. Максимальный воздушный зазор под краем полюсного наконечника

$$\delta_{max} = 1{,}5\delta = 1{,}5 \cdot 0{,}7 = 1{,}05\ см.$$

4. Коэффициент Картера

$$k_C = k_{C1}\, k_{C2} = 1{,}15 \cdot 1{,}01 = 1{,}16,$$

где

$$k_{C1} = \frac{t_1}{t_1 - b_1} = \frac{3{,}2}{3{,}2 - 0{,}43} = 1{,}15;$$

$$b_1 = b_п \frac{b_п}{5\delta + b_п} = 1{,}27 \cdot \frac{1{,}27}{5 \cdot 0{,}7 + 1{,}27} = 0{,}43\ см;$$

$$k_{C2} = \frac{t_к}{t_к - b_2} = \frac{2{,}56}{2{,}56 - 0{,}024} = 1{,}01;$$

$t_к \approx 0{,}8 t_1 = 2{,}56$ *см* — шаг демпферной клетки (ориентировочно);

$$b_2 = b_{о.к} \frac{b_{о.к}}{5\delta + b_{о.к}} = 0{,}3 \cdot \frac{0{,}3}{5 \cdot 0{,}7 - 0{,}3} = 0{,}024\ см;$$

$b_{о.к} = 0{,}3$ *см* — открытие паза демпферной клетки.

## XIII. Полюсные наконечники (§ 12—18)

1. Ширина полюсного наконечника

$$b_p = \alpha\tau = 0{,}7 \cdot 34{,}6 = 24{,}2\ см.$$

Принимаем $\alpha = 0{,}7$.

2. Радиус очертания полюсного наконечника

$$R_p = \frac{D}{2\left[1 + \frac{4D(\delta_{max} - \delta)}{b_p^2}\right]} = \frac{110}{2\left[1 + \frac{4 \cdot 110 \cdot (1{,}05 - 0{,}7)}{24{,}2^2}\right]} = 48{,}5\ см.$$

3. Длина полюсного наконечника

$$l_p = l = 29\ см$$

(толщина нажимных щек $\Delta' = 3$ *см*).

4. Высота полюсного наконечника с учетом размещения пусковой клетки $h_p = 4$ *см* по эскизу полюса (рис. 288) при $h''_p \approx 0{,}1\tau = 3{,}4$ *см*; проверяется затем по условиям механической прочности.

## XIV. Полюсные сердечники

1. Ширина полюсного сердечника

$$b_m = \frac{\sigma\Phi_1}{l_m \varphi_{Fe\,m} B_m} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}0541}{29 \cdot 0{,}97 \cdot 1{,}45 \cdot 10^{-4}} = 15{,}8\ см,$$

где $\sigma = 1{,}2$ — коэффициент рассеяния полюсов (предварительно);
$\varphi_{Fe\,m} = 0{,}97$ — коэффициент заполнения пакета полюсов при толщине листов $\Delta = 1{,}75$ *мм*; $l_m = l = 29$ *см*; $B_m = 1{,}45 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*² — принято ориентировочно.



2. Ориентировочная высота полюсного сердечника

$$h_m \approx (3{,}5 \div 4{,}0) \frac{F_{fN}}{s_f (b_p - b_m)} = (3{,}5 \div 4{,}0) \frac{2 \cdot 5650}{350 \cdot (24{,}2 - 15{,}8)} = (13{,}4 \div 15{,}4)\ см,$$

где $F_{fN} \approx 2F_{1N}$ (ориентировочно); $s_f = 350$ *а/см*² по табл. 81. Принимаем $h_m = 14{,}5$ *см*.

## XV. Внутренний диаметр и высота ярма ротора (§ 12—20)

1. Высота ярма ротора по магнитным условиям

$$h_{j2} = \frac{\sigma\Phi_1}{2 l_{j2} \varphi_{Fe\,m} B_{j2}} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}0541}{2 \cdot 29 \cdot 0{,}97 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-4}} = 9\ см,$$

где $l_{j2} = l = 29$ *см* — длина шихтованого ярма;
$B_{j2} = 1{,}25 \cdot 10^{-4}$ *вб/см*² — индукция в ярме.

2. Внутренний диаметр ярма ротора

$$D_{j2} = D - 2(\delta + h_p + h_m + h_{j2}) = 110 - 2(0{,}7 + 4 + 14{,}5 + 9) = 53{,}6\ см.$$

Уточняется после механического расчета обода.

## XVI. Проводимость потока рассеяния полюсов

1. Проводимость потока рассеяния между сердечниками

$$\lambda_m = \frac{1}{2}\frac{h_m}{c_m} + 0{,}41\frac{h_m}{l_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{14{,}5}{11{,}8} + 0{,}41 \cdot \frac{14{,}5}{29} = 0{,}836,$$

где $c_m = 11{,}8$ *см* — расстояние между сердечниками полюсов на половине высоты сердечника.

2. Проводимость потока рассеяния между полюсными наконечниками

$$\lambda_p = \frac{h_{pm}}{c_p} + 1{,}35\frac{h_{pm}}{l_p} = \frac{3{,}47}{10{,}4} + 1{,}35 \cdot \frac{3{,}47}{29} = 0{,}494,$$

где $c_p \approx \tau - b_p = 10{,}4$ *см* — расстояние между полюсными наконечниками:

$$h_{pm} = \frac{h'_p + 2h_p}{3} = \frac{2{,}4 + 2 \cdot 4}{3} = 3{,}47;\ h'_p = 2{,}4\ см\ (рис.\ 288).$$

3. Полная проводимость потока рассеяния между полюсами

$$\lambda_{s2} = \lambda_m + \lambda_p = 0{,}836 + 0{,}494 = 1{,}33.$$

## XVII. Характеристика намагничивания

Расчет характеристики намагничивания сведен в табл. 88.

## XVIII. Построение диаграммы Потье и определение м. д. с. возбуждения при номинальной нагрузке

1. Реактивность реакции якоря по продольной оси в относительных единицах

$$x_{ad} = k_d \frac{\mu_0 F_{1N}}{B_\delta \delta'} = 0{,}85 \cdot \frac{1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 5650}{0{,}833 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}81} = 0{,}905,$$

где $k_d = 0{,}85$ находится по рис. 267.

50 685

*Таблица 88*

**Расчетные данные для построения характеристики намагничивания**

| Наименование и формула | Единицы измерения | $k = 0,55$ | $k = 1,0$ | $k = 1,21$ |
|---|---|---|---|---|
| Э. д. с. статора $E_0 = kU_{лN}$ | *в* | 3300 | 6000 | 7260 |
| Поток первой гармонической $\Phi_1 = \frac{E_0}{\sqrt{3}\pi\sqrt{2}fk_w w_1}$ | *вб* | 0,0298 | 0,0541 | 0,0656 |
| Индукция первой гармонической в воздушном зазоре $B_{\delta1}\ \frac{\Phi_1}{\frac{2}{\pi}\tau l_i}$ | *вб/м²* | 0,51 | 0,925 | 1,12 |
| Действительная индукция в воздушном зазоре $B_\delta = \frac{1}{k_1} B_{\delta1}$, где $k_1 = 1,1$ определяется по рис. 13 | » | 0,46 | 0,833 | 1,01 |
| Действительный поток машины $\Phi = k_ф \Phi_1$, где $k_ф = 0,97$ определяется по рис. 12 | *вб* | 0,0286 | 0,0520 | 0,0630 |
| Идеальные индукции в различных сечениях зубцов статора: | | | | |
| $B'_{z1} = B_\delta \frac{t_1 l_i}{b_{z1} l_{Fe}}$ | *вб/м²* | 0,85 | 1,54 | 1,87 |
| $B'_{z12} = B'_{z1} \frac{b_{z1}}{b_{z12}}$ | » | 0,78 | 1,41 | 1,71 |
| $B'_{z13} = B'_{z1} \frac{b_{z1}}{b_{z13}}$ | » | 0,72 | 1,3 | 1,58 |
| Коэффициенты $k_z = \frac{b_{пx} l_i}{b_{zx} l_{Fe}}$: $k_{z1} = 0,73$; $k_{z2} = 0,67$; $k_{z3} = 0,61$ | | | | |
| Удельные м. д. с. в различных сечениях зубцов статора (сталь Э21) | | | | |
| $aw_{z1}$ | *а/см* | 3,52 | 30,1 | 170 |
| $aw_{z2}$ | » | 3,06 | 16,4 | 82 |
| $aw_{z3}$ | » | 2,71 | 11,4 | 39 |
| Расчетное значение удельной м. д. с. в зубцах статора $aw_z = \frac{aw_{z1} + aw_{z2} + aw_{z3}}{6}$ | *а/см* | 3,08 | 17,8 | 89,5 |
| Индукция в ярме статора $B_{j1} = \frac{\Phi}{2l_{Fe}h_{j1}}$ | *вб/м²* | 0,7 | 1,27 | 1,54 |
| Удельная м. д. с. в ярме статора $aw_{j1}$ | *а/см* | 1,55 | 4,75 | 10,4 |



*Продолжение табл. 88*

| Наименование и формула | Единицы измерения | $k = 0,55$ | $k = 1,0$ | $k = 1,21$ |
|---|---|---|---|---|
| М. д. с. на отдельные участки статора: | | | | |
| на зазор $2F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta'$ | *а* | 5940 | 10 750 | 13 000 |
| на зубцы $2F_z = aw_z \cdot 2h_п$ | » | 38 | 221 | 1110 |
| на ярмо $2F_{j1} = aw_{j1} \frac{\pi(D_{j1} - h_{j1})}{2p}$ | » | 64 | 197 | 430 |
| Коэффициент рассеяния полюсов при холостом ходе $\sigma = 1 + 4 \frac{\lambda_{s2} \cdot 0,4\pi l_p (F_\delta + F_z + F_{j1})}{\Phi \cdot 10^8}$ | » | 1,202 | 1,206 | 1,222 |
| Поток в полюсах $\Phi_m = \sigma\Phi$ | *вб* | 0,0344 | 0,0627 | 0,077 |
| Индукция в сердечниках полюсов $B_{m1} = \frac{\Phi_m}{l_m b_m \varphi_{Fem}}$ | *вб/м²* | 0,765 | 1,4 | 1,71 |
| Индукция в верхнем сечении $B_{m3} = B_{m1} \frac{(\sigma - 1)\frac{\lambda_p}{\lambda_{s2}} + 1}{\sigma}$ | » | 0,685 | 1,25 | 1,51 |
| Индукция в среднем сечении $B_{m2} = B_{m3} + \frac{3}{4}(B_{m1} - B_{m2})$ | *вб/м²* | 0,745 | 1,36 | 1,66 |
| Удельные м.д.с. в различных сечениях полюсов ротора (сталь для полюсов) | | | | |
| $aw_{m1}$ | *а/см* | 3,84 | 14,9 | 75,3 |
| $aw_{m2}$ | » | 3,72 | 13,0 | 55,8 |
| $aw_{m3}$ | » | 3,16 | 9,4 | 24,5 |
| Расчетная удельная м.д.с. на полюсные сердечники $aw_m = \frac{aw_{m1} + 4aw_{m2} + aw_{m3}}{6}$ | » | 3,63 | 12,7 | 53,5 |
| Индукция в ярме ротора $B_{j2} = \frac{\Phi_m}{2l_{j2}h_{j2}}$ | *вб/м²* | 0,66 | 1,2 | 1,47 |
| Удельная м.д.с. в ярме ротора $aw_{j2}$ | *а/см* | 5,8 | 13 | 26 |
| М.д.с. на отдельные участки ротора: на полюс $2F_m = aw_m 2(h_p + h_m)$ | *а* | 128 | 448 | 1885 |
| на ярмо $2F_{j2} = aw_{j2} \frac{\pi(D_{j2} + h_{j2})}{2p}$ | » | 117 | 262 | 525 |
| Суммарная м.д.с. на пару полюсов $2F_0 = 2F_\delta + 2F_z + 2F_{j1} + 2F_m + 2F_{j2}$ | » | 6287 | 11 878 | 16 950 |
| Ток возбуждения в относительных еди- | | | | |

| Наименование и формула | Единицы измерения | $k = 0{,}55$ | $k = 1{,}0$ | $k = 1{,}21$ |
|---|---|---|---|---|
| ницах (отнесенный к $i_{f0}$ при $E_0 = U_N$) $i_f$ | — | 0,535 | 1,0 | 1,44 |
| Нормальная характеристика холостого хода $i_f$ | — | 0,5 | 1,0 | 1,5 |
| Ток возбуждения, отнесенный к $i_{f\delta}$ | — | 0,585 | 1,1 | 1,57 |

2. Проводимость потоков рассеяния обмотки статора:
в пазовой части

$$\lambda_п = \frac{3y+1}{4}\left(\frac{h_0}{b_0}+\frac{h_1}{3b_п}\right) = \frac{3\cdot 0{,}832+1}{4}\cdot\left(\frac{0{,}9}{1{,}27}+\frac{4{,}7}{3\cdot 1{,}27}\right) = 1{,}69,$$

где $h_1 = 4{,}7$ *см*; $h_0 = 0{,}9$ *см*; $b_0 = b_п = 1{,}27$ *см* определяются по эскизу паза;
в лобовой части

$$\lambda_л = \frac{0{,}3DZ_1}{2p^2 l_i}\,\frac{3y-1}{2} = \frac{0{,}3\cdot 110\cdot 108}{2\cdot 5^2\cdot 26{,}5}\cdot\frac{3\cdot 0{,}832-1}{2} = 2{,}02;$$

в зазоре

$$\lambda_к = \frac{5\delta'}{5b_0+4\delta'} = \frac{5\cdot 0{,}81}{5\cdot 1{,}27+4\cdot 0{,}81} = 0{,}42.$$

3. Реактивность рассеяния статора

$$x_s = 2\pi\mu_0\frac{F_{1N}l_i}{k_w^2\Phi}\frac{2p}{Z_1}(\lambda_п+\lambda_л+\lambda_к) + \left[\frac{5}{8}\left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2+\sigma_в\right]x_{ad} =$$

$$= 2\pi\cdot 1\cdot 256\cdot 10^{-8}\cdot\frac{5650\cdot 26{,}5}{0{,}895^2\cdot 0{,}052}\cdot\frac{10}{108}\cdot(1{,}69+2{,}02+0{,}41)+\frac{5}{8}\times$$

$$\times\left(\frac{10}{108}\right)^2\cdot 0{,}905 = 0{,}109+0{,}0044 = 0{,}113,$$

где $\sigma_В = 0$ определяется по рис. 26 при $y = 0{,}832$.

4. Реактивность реакции якоря по поперечной оси

$$x_{aq} = k_q\frac{\mu_0 F_{1N}}{B_\delta\delta'} =$$

$$= 0{,}42\cdot\frac{1{,}256\cdot 10^{-8}\cdot 5650}{0{,}833\cdot 10^{-4}\cdot 0{,}81} = 0{,}44,$$

где $k_q = 0{,}42$ определяется по рис. 267.

5. Синхронные реактивности:

$$x_d = x_{ad} + x_s = 0{,}905 + 0{,}113 = 1{,}018;$$

$$x_q = x_{aq} + x_s = 0{,}44 + 0{,}113 = 0{,}553.$$

6. Строим диаграмму Потье (рис. 287), определяем м. д. с. возбуждения при номинальном режиме (на пару полюсов) и статическую перегружаемость

$$2F_{fN} = 1{,}86\cdot 2F_0 = 1{,}86\cdot 11\,878 = 22\,100\ а;$$

$$M_{max} = \frac{E_{fN}U_N}{x_d} = \frac{1{,}86}{1{,}018} = 1{,}82$$

или $\dfrac{1{,}82}{\eta_N\cos\varphi_N}M_N = 2{,}46M_N$.

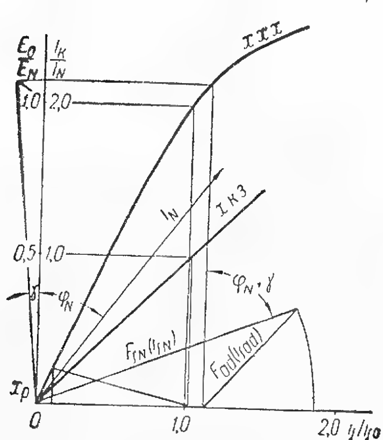



Рис. 287. Характеристики холостого хода (х. х. х.), короткого замыкания (х. к. з.) и диаграмма Потье.



## XIX. Расчет обмотки возбуждения (§ 12-22)

1. Общее сечение меди обмотки возбуждения

$$Q_{Cuf} = \frac{F_{fN}}{s_f} = \frac{11\,050}{350} = 31{,}6\ см^2.$$

2. Ширина меди обмотки возбуждения

$$b_{Cuf} = (0{,}5\div 0{,}75)\frac{b_p - b_m}{2};$$

принято

$$b_{Cuf} = 0{,}75\frac{b_p - b_m}{2} = 3{,}0\ см;$$

$$H_{Cuf} = \frac{Q_{Cuf}}{b_{Cuf}} = \frac{31{,}6}{3{,}0} = 10{,}6\ см.$$

3. Выбираем размеры меди по стандарту, проверяя $q_f$ по § 12-22, в зависимости от $U_f$

$$a_f\times b_f = (1{,}68\times 32)\ мм^2.$$

Сечение меди

$$q_f = 0{,}536\ см^2.$$

4. Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$w_f = \frac{H_{Cuf}}{ax} = \frac{10{,}6}{0{,}168} = 63{,}2;$$

принимаем

$$w_f = 63{,}5.$$

5. Ток возбуждения при номинальной нагрузке

$$i_{fN} = \frac{F_{fN}}{w_f} = \frac{11\,050}{63{,}5} = 174\ а.$$

6. Ток возбуждения при холостом ходе и э. д. с. $E_0 = U_N$

$$i_{f_0} = \frac{F_{f_0}}{w_f} = \frac{5889}{63{,}5} = 93\ а.$$

7. Длина витка обмотки возбуждения (витки с двумя радиусами закругления по приложению VI)

$$l_{wf} = 2(l_m + 2\Delta' + b_m - 2r) + \pi(2r + 2\Delta_{if} + b_f) =$$

$$= 2\cdot(29 + 2\cdot 3 + 15{,}8 - 2\cdot 2{,}5) + \pi(2\cdot 2{,}5 + 2\cdot 0{,}25 + 3{,}2) = 109{,}3\ см,$$

где $r = 2{,}5$ *см* — радиус закругления полюса;
$\Delta_{if} = 0{,}25$ *см* — толщина изоляции полюса (односторонняя).

8. Сопротивление обмотки возбуждения при различных температурах

$$r_{f(15)} = \rho_{15}\frac{2pw_f l_{wf}}{q_f} = 1{,}75\cdot 10^{-6}\cdot\frac{10\cdot 63{,}5\cdot 109{,}3}{0{,}536} = 0{,}228\ ом;$$

$$r_{f(75)} = 1{,}24r_{f(15)} = 1{,}24\cdot 0{,}228 = 0{,}282\ ом;$$

$$r_{f(100)} = 1{,}32r_{f(15)} = 1{,}32\cdot 0{,}228 = 0{,}306\ ом.$$

9. Напряжение на зажимах обмотки возбуждения:
при номинальной нагрузке

$$U_{fN} = i_{fN}r_{f(100)} = 174\cdot 0{,}306 = 53{,}5\ в;$$

при холостом ходе и $E_0 = U_N$

$$U_{f_0} = i_{f_0}r_{f(15)} = 93\cdot 0{,}228 = 21{,}2\ в.$$

10. Плотность тока в обмотке возбуждения:
при номинальной нагрузке

$$s_{fN} = \frac{i_{fN}}{q_f} = \frac{174}{0,536} = 325\ a/см^2;$$

при холостом ходе машины и $E_0 = U_N$

$$s_{f_0} = \frac{i_{f_0}}{q_f} = \frac{93}{0,536} = 173\ a/см^2.$$

11. Номинальная мощность возбуждения

$$P_{fN} = i_{fN}U_{fN} + \Delta U i_{fN} = 174 \cdot 53,5 + 2 \cdot 174 = 9300 + 348 = 9650\ вт,$$

где $\Delta U = 2в$ — падение в щеточном контакте.

12. Перегрев обмотки возбуждения по § 12—22 для однорядных катушек

$$\theta_f = \frac{P_f}{\alpha_f k_\beta S_f} = \frac{9650}{0,0175 \cdot 1 \cdot 11\,700} = 47°C,$$

где $\alpha_f = 0,0175\ вт/°C \cdot см^2$ — по рис. 62;
$k_\beta \approx 1,0$ — по рис. 62;
$S_f = 2pl_{wf}H_{Cuf} = 11\,700\ см^2$.

13. Высота полюсного сердечника (уточнение) с учетом высоты меди, толщины междувитковой изоляции и прессующих шайб

$$h_m = 10,7 + 64 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,75 = 15,4\ см.$$

14. Внутренний диаметр ярма ротора (уточненно)

$$D_{j_2} = D - 2(\delta + h_p + h_m + h_{j_2}) = 110 - 2 \cdot (0,7 + 4 + 15,4 + 16) = 38\ см,$$

где $h_{j_2} = 16\ см$ — с учетом вырезов под крепления полюсов.

## XX. Выбор пусковой клетки (§ 12—19, 12-25)

1. Количество стержней на полюс

$$n_c = \frac{b_p - t_к}{t_к} = \frac{24,2 - 2,56}{2,56} = 8,5,$$

где $t_к = 0,8t_1 = 2,56\ см$.

Принимаем $n_c = 9$.

2. Эквивалентное активное сопротивление роторных цепей при $s = 1$

$$r_{2п} = \frac{M_п}{\left(\frac{I_{2п}}{c_1}\right)^2} = \frac{1,5}{4,1^2} = 0,089,$$

где

$$\frac{I_{2п}}{c_1} = I_{1п} - \frac{U}{2}\left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q}\right) = 5 - 0,5 \cdot \left(\frac{1}{1,018} + \frac{1}{0,553}\right) = 4,1.$$

3. Сопротивление цепи возбуждения

$$r_{fк} = r_f(k + 1) = 0,0022 \cdot 11 = 0,0242,$$

где $k = 10$ — кратность разрядного сопротивления;

$$r_f = \rho_{75}\frac{8}{\pi^2}k_d^2\frac{l_{wf}}{4\omega_f q_f}\cdot\frac{F_{1N}}{f\Phi_N} =$$

$$= 2,17 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot 0,85^2 \cdot \frac{109,3}{4 \cdot 63,5 \cdot 0,536} \cdot \frac{5650}{50 \cdot 0,052} = 0,0022;$$



4. Входной момент при $\alpha = \frac{r_{fк}}{r_{кd}} = 0,2$; $s_{вх} = 0,05$ и $U = 1$

$$M_{вх} \approx \frac{U^2 s_{вх}}{2r_{fк}}\left\{\frac{\alpha + 1}{c_{1d}^2\left[1 + \frac{c_1^2 s_{вх}^2}{I_{2п}^2 r_{fк}^2}(\alpha+1)^2\right]} + \frac{\alpha}{c_{1q}^2\left[1 + 1,3\frac{c_1^2 s_{вх}^2}{I_{2п}^2 r_{fк}^2}\alpha^2\right]}\right\} =$$

$$= \frac{0,05}{2 \cdot 0,0242}\left\{\frac{0,2 + 1}{1,125^2\,[1 + 0,505^2\,(0,2 + 1)^2]} + \right.$$

$$\left. + \frac{0,2}{1,257^2 \cdot [1 + 1,3 \cdot 0,505^2 \cdot 0,2^2]}\right\} = 0,84,$$

то есть получили величину, близкую к заданной.

Здесь

$$c_{1d} = 1 + \frac{x_s}{x_{ad}} = 1,125; \qquad c_{1q} = 1 + \frac{x_s}{x_{aq}} = 1,257;$$

$$c_1 = \frac{c_{1d} + c_{1q}}{2} = 1,19.$$

5. Сопротивление пусковой клетки при $s = 1$ по условиям пускового момента

$$r_{кd} \approx \frac{2r_{2п}}{c_r(1)\,c_{1d}^2 + 0,75c_{1q}^2} = \frac{2 \cdot 0,089}{0,7 \cdot 1,125^2 + 0,75 \cdot 1,257^2} = 0,085,$$

где для $\alpha = 0,2$; $c_r(1) = 0,5 \div 0,9$. Принимаем $c_r(1) = 0,7$.

Выбираем $r_{кd}$ по входному моменту, при этом удовлетворяется и требование пускового момента, так как

$$r_{кd} = \frac{r_{fк}}{\alpha} = \frac{0,0242}{0,2} = 0,121.$$

6. Сечение стержней на полюс $\left(стержни\ латунные,\ \rho_c' = \frac{\rho_c}{\rho_{Cu}} = 4\right)$

$$\Sigma q_c = \rho_{75}\frac{F_{1N}\rho_c' l_{cd}(1 + k_л)}{r_{кd} f\Phi_N} =$$

$$= 2,17 \cdot 10^{-6}\frac{5650 \cdot 4 \cdot 44 \cdot (1 + 0,2)}{0,121 \cdot 50 \cdot 0,052} = 8,2\ см^2,$$

где $k_л = \frac{0,4D_л}{pl_c}\frac{\rho_л'}{\rho_c'} = \frac{0,4 \cdot 106}{5 \cdot 44} \cdot \frac{4}{4} = 0,2.$

7. Диаметр стержня при $n_c = 9$

$$d_c = \sqrt{\frac{4}{\pi}q_c} = \sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{\Sigma q_c}{n_c}} = \sqrt{\frac{4}{3,14}\frac{8,2}{9}} = 1,08\ см.$$

Принимаем $d_c = 1,1\ см$ (стандартный стержень); $q_c = 0,945\ см^2$.

8. Шаг пусковой обмотки

$$t_к = \frac{b_p}{n_c + 1} = \frac{24,2}{9 + 1} = 2,42\ см.$$

9. Сечение замыкающих колец пусковой обмотки

$$q_л \approx 0,5\Sigma q_c = 0,5 \cdot 9 \cdot 0,945 = 4,25\ см^2.$$

Материал колец — латунь, размеры сечения $a_к b_к = 2,5 \times 1,8\ см$; $q_л = 4,49\ см^2$.

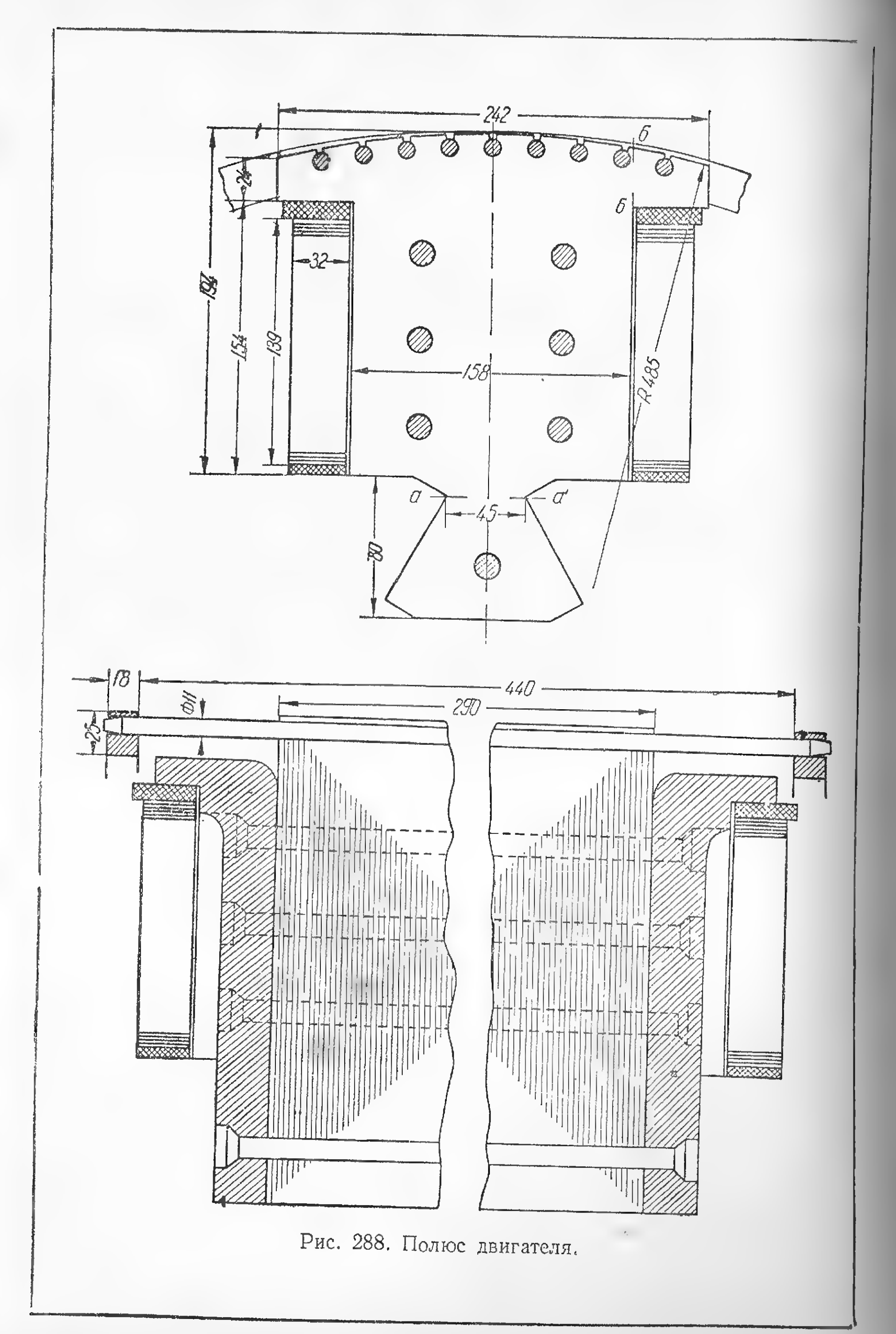



Рис. 288. Полюс двигателя.

10. Размеры открытия пазов пусковой клетки

$$h_{ок} = 0{,}3\ см;\ b_{ок} = 0{,}3\ см.$$

По размерам, рассчитанным в XIII, XIV, XIX, XX, вычерчиваем эскиз полюса двигателя (рис. 288).

### XXI. Вес активных материалов и характеристика использования активных материалов (§ 12-23)

1. Вес меди обмотки статора без изоляции

$$G_{Cu1} = mw_1 l_{w1} q_ф \gamma_{Cu} = 3 \cdot 324 \cdot 172 \cdot 0{,}133 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 198\ кг,$$

где $\gamma_{Cu} = 8{,}9 \cdot 10^{-3}\ кг/см^3$.

2. Вес изоляции обмотки статора

$$G_i = 2\gamma_i Z_1 (h_c + b_c - 2\Delta_i)\Delta_i l_{w1} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 108 \cdot (2{,}71 + 1{,}24 - 0{,}57) \cdot 0{,}285 \cdot 172 = 71{,}5\ кг,$$

где $h_c = 2{,}71\ см$ — высота изолированной секции;
$b_c = 1{,}24\ см$ — ширина изолированной секции;

$$\Delta_i = 0{,}285\ см;\ Z_1 = 108;\ l_{w1} = 172\ см.$$

3. Вес обмоточного провода обмотки статора с изоляцией ПБД

$$G'_{Cu_1} = 1{,}04\, G_{Cu1} = 1{,}04 \cdot 198 = 206\ кг.$$

4. Вес меди обмотки возбуждения

$$G_{Cuf} = 2pw_f l_{wf} q_f \gamma_{Cu} = 10 \cdot 63{,}5 \cdot 109{,}3 \cdot 0{,}536 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 332\ кг.$$

5. Вес меди пусковой клетки (латунь)

$$G_{Cuкd} = (2pn_c q_c l_c + 2\pi D_л q_л)\gamma_л = (10 \cdot 9 \cdot 0{,}945 \cdot 44 + 2\pi \cdot 106 \cdot 4{,}45) \times 8{,}5 \cdot 10^{-3} = 66{,}4\ кг,$$

где $\gamma_л = 8{,}5 \cdot 10^{-3}$ — удельный вес латуни, $кг/см^2$;
$D_л = 106\ см$ — средний диаметр замыкающих колец;
$l_c = 43\ см$ — длина стержня.

6. Суммарный вес меди машины

$$G_{Cu} = G_{Cu1} + G_{Cuf} + G_{Cuкd} = 198 + 332 + 66{,}4 = 586{,}4\ кг.$$

7. Заготовительный вес железа статора

$$G'_{Fe} = 3{,}92 \cdot 1{,}125 \cdot 298 = 1310\ кг.$$

где 3,92 $кг$ — вес 1 $м^2$ листа;
1,125 $м^2$ — площадь листа;
298 — число листов.

8. Коэффициент использования листов электротехнической стали

$$k_{исп} = \frac{G_{Fe}}{G'_{Fe}} = \frac{930}{1310} = 0{,}71.$$

9. Чистый вес стали полюсов ротора (без щек)

$$G_m = 2pl_p S_p \varphi_{Fem} \gamma_{Fe} = 10 \cdot 29 \cdot 365 \cdot 0{,}97 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 800\ кг,$$

где $S_p = 365\ см^2$ — площадь торцовой поверхности полюса.

10. Заготовительный вес стали полюсов

$$G'_m = 2pl_p S'_p \varphi_{Fem} \gamma_{Fe} = 10 \cdot 29 \cdot 505 \cdot 0{,}97 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 1110\ кг,$$

где $S'_p = 505\ см^2$ — площадь торцовой поверхности полюса с учетом отходов при штамповке.

11. Удельный расход «чистых» материалов меди на 1 *ква* (с пусковой клеткой)

$$g_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P_i} = \frac{586{,}4}{750} = \mathbf{0{,}78}\ \textit{кг/ква};$$

стали статора (Э21)

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P_i} = \frac{930}{750} = \mathbf{1{,}24}\ \textit{кг/ква};$$

стали полюсов

$$g_m = \frac{G_m}{P_i} = \frac{800}{750} = 1{,}065\ \textit{кг/ква}.$$

12. Расход активной стали на 1 *ква* с учетом отходов на штамповку

$$g'_{Fe} = \frac{G'_{Fe}}{P_i} = \frac{1310}{750} = 1{,}75\ \textit{кг/ква};$$

$$g'_m = \frac{G'_m}{P_i} = \frac{1100}{750} = 1{,}48\ \textit{кг/ква}.$$

## XXII. Расчет потерь и к. п. д. (§ 12-23)

1. Основные потери в меди статора

$$p_{Cu\,(осн)} = 3I_N^2 r_{1(75)} = 3 \cdot 72{,}2^2 \cdot 0{,}91 = \mathbf{14\,200}\ \textit{вт} = 14{,}2\ \textit{квт}.$$

2. Коэффициент добавочных потерь

$$k_r = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3}\psi(\xi) = 1 + \frac{18^2 - 1}{3} \cdot \frac{1}{3}\, 0{,}137^4 = 1{,}01,$$

где $m = 18$ — число проводников по высоте паза;

$$\xi = h_{пр}\sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\rho}\frac{b_{Cu}}{b_п}} = 0{,}195 \cdot \sqrt{\frac{1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 314}{2 \cdot 2{,}17 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0{,}69}{1{,}27}} = 0{,}137;$$

$$\varphi(\xi) = 1 + \frac{4}{45}\xi^4 \approx 1{,}00; \qquad \psi(\xi) = \frac{1}{3}\xi^4 = \frac{1}{3} \cdot 0{,}137^4.$$

В данном случае в виду малой высоты проводника добавочные потери незначительны.

3. Потери в зубцах статора

$$p_z = k_z p'_z \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_z = 1{,}7 \cdot 5{,}02 \cdot 1 \cdot 264 = 2250\ \textit{вт} = 2{,}25\ \textit{квт},$$

где $k_z = 1{,}7$; $p'_z = p_{10}(B_{z1/2}\ \textit{вб/м}^2)^2 = 2{,}5 \cdot 1{,}41^2 = 5{,}02$ *вт/кг*;
$p_{10} = 2{,}5$ *вт/кг* — потери в листовой стали Э21 (приложение 2) при индукции $B = 1{,}0$ *вб/м²*;
$B_{z1/2} = 1{,}41$ *вб/м²* — среднее значение индукции в зубцах.

4. Потери в ярме статора

$$p_{j_1} = k_j p'_j \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_j = 1{,}3 \cdot 4{,}05 \cdot 1 \cdot 666 = 3520\ \textit{вт}\ (3{,}52\ \textit{квт}),$$

где $k_j = 1{,}3$; $B_{j_1} = 1{,}37$ *вб/м²*; $p'_j = 2{,}5 \cdot 1{,}37^2 = 4{,}05$ *вт/кг*.

5. Суммарные потери в железе статора

$$p_{Fe} = p_z + p_{j_1} = 2{,}25 + 3{,}52 = 5{,}77\ \textit{квт}.$$

6. Добавочные потери на поверхности полюсного наконечника на холостом ходу

$$p_{oR} = 0{,}5k'_0 (B_0 t_1)^2 \left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5} f_N^{1,5} S_R =$$

$$= 0{,}5 \cdot 3200 \cdot (0{,}133 \cdot 10^{-4} \cdot 3{,}2)^2 \cdot \left(\frac{108}{5}\right)^{1,5} \cdot 50^{1,5} \cdot 7000 = 730\ \textit{вт} = 0{,}73\ \textit{квт},$$



где $k'_0 = 3200$ для листов толщиной 1,75 *мм* (табл. 6, стр. 120);

$$B_0 = (k_C - 1) B_\delta = (1{,}16 - 1) \cdot 0{,}833 \cdot 10^{-4} = 0{,}133 \cdot 10^{-4}\ \textit{вб/см}^2;$$

$$S_R = 2pb_p l_p = 10 \cdot 24{,}2 \cdot 29 = 7000\ \textit{см}^2.$$

7. Добавочные потери при нагрузке:
от 3-й гармонической индукции в зубцах статора

$$p_{z3} = 10{,}7\, p_{10} (B_3\ \textit{вб/м}^2)^{\frac{5}{4}} = 10{,}7 \cdot 2{,}5 \cdot (0{,}246)^{\frac{5}{4}} \cdot 266 = 1240\ \textit{вт}\ (1{,}24\ \textit{квт}),$$

где $B_3 = B_{z1/2}(A_{3m}x_d + 1{,}27x_{ad}A_{30}) = 1{,}41 \cdot (0{,}05 \cdot 1{,}018 + 1{,}27 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}122) = 0{,}246$ *вб/м²*;
$A_{3m} = A_1 B_1 - 0{,}7 = 2{,}2 \cdot 0{,}34 - 0{,}7 = 0{,}05$ и $A_{30} = A_1 A_2 = 0{,}5 \cdot 0{,}245 = 0{,}122$ (по рис. 35);
на поверхности полюсов от зубчатости м. д. с. статора

$$p_{zR} = 0{,}5 \cdot k'_0 (B_{zR} t_1)^2 \left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5} f_N^{1,5} S_R =$$

$$= 0{,}5 \cdot 3200 \cdot (0{,}123 \cdot 10^{-4} \cdot 3{,}2)^2 \cdot \left(\frac{108 \cdot 50}{5}\right)^{1,5} \cdot 7000 = 610\ \textit{вт}\ (0{,}61\ \textit{квт}),$$

где

$$B_{zR} = \sqrt{2}\,\mu_0 \frac{At_1}{2\delta} k_{\nu 1} = \sqrt{2} \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{405 \cdot 3{,}2}{2 \cdot 0{,}7} \cdot 0{,}746 = 0{,}123 \cdot 10^{-4}\ \textit{вб/см}^2;$$

$$k_{\nu 1} = \frac{2\pi \frac{\delta}{t_1}}{\operatorname{sh} 2\pi \frac{\delta}{t_1}} = 0{,}746;$$

на поверхности полюсов от высших гармонических м. д. с. статора

$$p_{\nu R} = S_R \frac{8}{\pi^2} k'_0 A^2 \tau^4 \mu_0^2 f_N^{1,5} \left(\frac{k_{\nu r}}{\delta'}\right)^2 \varphi_1(y)\, k_\nu^2 =$$

$$= 7000 \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot 3200 \cdot 405^2 \cdot 34{,}6^4 \cdot 1{,}256^2 \cdot 10^{-16} \cdot 50^{1,5} \left(\frac{1}{0{,}81}\right)^2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-4} = 30\ \textit{вт} = 0{,}03\ \textit{квт},$$

где $k_\nu = 1{,}0$; $\varphi_1(y) = 0{,}8 \cdot 10^{-4}$ — по рис. 34;
в нажимных плитах

$$p_{пл} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{\tau y}{4}\right)^{\frac{2}{3}}} \pi \left(D + \frac{\tau}{4}\right) F_{1N}^2 = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{34{,}6 \cdot 0{,}832}{4}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \pi \left(110 + \frac{34{,}6}{4}\right) \times 5650^2 = 90\ \textit{вт} = 0{,}09\ \textit{квт}.$$

8. Суммарные добавочные потери

$$p_{доб} = p_{oR} + p_{zR} + p_{\nu 3} + p_{z3} + p_{пл} = 0{,}73 + 0{,}61 + 0{,}03 + 1{,}24 + 0{,}09 = 2{,}7\ \textit{квт}.$$

Суммарные добавочные потери для синхронных машин мощностью до 1000 *ква*

$$p_{доб} \leqslant 0{,}005 P_{2N} = 2{,}8\ \textit{квт}.$$

В данном случае $p_{доб} = 2{,}7$ *квт*, то есть в пределах нормы.

9. Потери на возбуждение (с собственным возбудителем)

$$p_f = \frac{i_{fN} U_{fN} + \Delta U i_{fN}}{\eta_в} = \frac{174 \cdot 53{,}5 + 2 \cdot 174}{0{,}8} = 12\,000\ \textit{вт} = 12\ \textit{квт},$$

где $\Delta U = 2$ *в* — падение напряжения в щеточных контактах;
$\eta_в = 0{,}8$ — к. п. д. возбудителя.

10. Потери на трение в подшипниках (подшипники скользящего трения, вал горизонтальный)

$$p_т = 2{,}3 l_ц \frac{50}{\theta^\circ} \sqrt{\lambda_{50} p_ц d_ц \left(1 + 4\frac{d_ц}{l_ц}\right)} v_ц^{1,5} =$$

$$= 2{,}3 \cdot 21 \cdot \frac{50}{40} \cdot \sqrt{0{,}002 \cdot 3{,}85 \cdot 14 \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{14}{21}\right)} \cdot 4{,}4^{1,5} = 350\ вт = 0{,}35\ квт;$$

где $l_ц = 21$ *см* — длина цапфы;
$d_ц = 14$ *см* — диаметр цапфы;
$\theta^\circ = 40^\circ$ С — температура нагрева масла
(эти величины, принятые предварительно, уточняются после механического расчета);
$\lambda_{50} = 0{,}002$ *сек кг/м²* — вязкость масла при температуре 50° С;

$$p_ц = \frac{G_{рот}}{2 l_ц d_ц} = \frac{2180}{2 \cdot 21 \cdot 14} = 3{,}85\ кг/см^2;$$

$$v_ц = \pi d_ц n = \pi \cdot 14 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{600}{60} = 4{,}4\ м/сек;$$

$G_{рот} = 2180$ *кг* — ориентировочно.

11. Потери на вентиляцию

$$p_v = p_{v1} + p_{v2} = 2{,}77 + 4{,}6 = 7{,}36\ квт.$$

Здесь потери на перемещение вентилирующего воздуха полюсами

$$p_{v1} = 1{,}1\, V_a (v^2 - v'^2) = 1{,}1 \cdot 3{,}82 \cdot (34{,}6^2 - 22{,}4^2) = 2{,}77\ квт,$$

где $V_a = \frac{\Sigma' p}{1{,}1 \Delta\theta_a} = \frac{42}{1{,}1 \cdot 10} = 3{,}82\ м^3$; $\Sigma' p = 42$ *квт*;
$\Delta\theta_a = 10^\circ$ С;
$v = \pi D n = 34{,}6$ *м/сек* — окружная скорость на поверхности ротора;
$v' = \pi (D - 2h_m - 2h_p) n = 22{,}4$ *м/сек* — окружная скорость у основания полюса;
потери на трение ротора о воздух

$$p_{v2} = c\omega^3 D_R^5 \left(1 + 5\frac{l_R}{D_R}\right) = 2 \cdot 10^6 \cdot 62{,}8^3 \cdot 1{,}086^5 \cdot \left(1 + 5 \cdot \frac{0{,}45}{1{,}086}\right) = 4{,}6\ квт,$$

где $c = 2 \cdot 10^{-6}$ — постоянная «шероховатости»;

$$\omega = 2\pi n = 2\pi \frac{600}{60} = 62{,}8;$$

$l_R = 0{,}45$ *м* — длина ротора, *м*;
$D_R = 1{,}086$ *м* — диаметр ротора, *м*.

12. Суммарные потери в машине

$$\Sigma p = p_{Cu1} + p_{Fe} + p_f + p_т + p_v + p_{доб} = 14{,}2 + 5{,}77 + 12 + 0{,}35 + 7{,}36 + 2{,}7 = 42{,}38\ квт.$$

13. Коэффициент полезного действия

$$\eta_N = 1 - \frac{\Sigma p}{P_{2N} + \Sigma p} = 1 - \frac{42{,}38}{560 + 42{,}38} = 0{,}929$$

(был принят предварительно $\eta = 93\%$).

## XXIII. Расчет параметров машины (§ 12-24)

1. Активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах

$$r_1 = r_{1(75)} \frac{\sqrt{3}\, I_N}{U_{лN}} = 0{,}91 \frac{\sqrt{3} \cdot 72{,}2}{6000} = 0{,}019.$$



2. Реактивность рассеяния статора была определена выше

$$x_s = 0{,}113.$$

3. Реактивности реакции якоря

$$x_{ad} = 0{,}95 \quad и \quad x_{aq} = 0{,}44.$$

4. Синхронные реактивности статора

$$x_d = 1{,}018 \quad и \quad x_q = 0{,}553.$$

5. Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_f = \frac{(i_{f\delta}\, x_{ad})^2}{P_t} r_{f(75)} = \frac{(84{,}6 \cdot 0{,}905)^2}{750 \cdot 10^3} 0{,}282 = 0{,}00219,$$

где $i_{f\delta} = 84{,}6a$ — по диаграмме Потье (рис. 279).

6. Реактивность рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{fs} = 0{,}4\pi\lambda_{fs} \frac{l F_{1N}}{\Phi_N \cdot 10^8} \cdot \frac{4}{\pi} k_d^2 = 0{,}4\pi \cdot 5{,}39 \cdot \frac{29 \cdot 5650}{0{,}052 \cdot 10^8} \frac{4}{\pi} \cdot 0{,}85^2 = 0{,}196,$$

где

$$0{,}4\pi\lambda_{fs} = 0{,}4\pi \left[4\left(\frac{h_m}{3c_m} + \frac{h_{pm}}{c_p} + \frac{2h_m + 0{,}3b_m}{4l}\right) + \sigma_{\delta_2} \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{\delta}\right] =$$

$$= 0{,}4\pi \left[4\left(\frac{15{,}4}{3 \cdot 11{,}8} + \frac{3{,}47}{10{,}4} + \frac{2 \cdot 15{,}4 + 0{,}3 \cdot 15{,}8}{4 \cdot 29}\right) + 0{,}03 \cdot \frac{2}{\pi} \times \frac{34{,}6}{0{,}7}\right] = 5{,}39;$$

$\sigma_{\delta_2} = 0{,}03$ (гл. 4, стр. 108).

7. Полная реактивность рассеяния обмотки возбуждения

$$x_f = x_{ad} + x_{fs} = 0{,}905 + 0{,}196 = 1{,}10.$$

8. Реактивность рассеяния успокоительной обмотки по продольной

$$x_{kd} = \frac{2\pi\mu_0 F_{1N} l_i}{\Phi_N n_C} \lambda_{kd} = \frac{2\pi \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \cdot 5650 \cdot 26{,}5}{0{,}052 \cdot 9} 2{,}58 = 0{,}0655,$$

где $\lambda_{kd} = \lambda_{kdп} + \lambda_{kdл} + \lambda_{kd\delta} = 1{,}623 + 0{,}705 + 0{,}248 = 2{,}58;$

$$\lambda_{kdп} = 0{,}623 + \frac{0{,}3}{0{,}3} = 1{,}623;$$

$$\lambda_{kdл} = 0{,}06 \frac{\tau}{l_i} n_c = 0{,}06 \cdot \frac{34{,}6}{26{,}5} \cdot 9 = 0{,}705;$$

$$\lambda_{kd\delta} \approx \frac{t_к}{12\delta'} = \frac{2{,}42}{12 \cdot 0{,}81} = 0{,}248.$$

9. Реактивность рассеяния успокоительной обмотки по поперечной оси

$$x_{kq} \approx 0{,}75 x_{kd} = 0{,}75 \cdot 0{,}0655 = 0{,}049.$$

10. Сверхпереходные реактивности

$$x''_d = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{kd}}} = 0{,}113 + \frac{1}{\frac{1}{0{,}905} + \frac{1}{0{,}196} + \frac{1}{0{,}0655}} = 0{,}159;$$

$$x_q = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{kq}}} = 0{,}113 + \frac{1}{\frac{1}{0{,}44} + \frac{1}{0{,}049}} = 0{,}157.$$

11. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси в относительных единицах

$$r_{kd} = \rho_{75} \frac{F_{1N}}{f\Phi_N}\left(\frac{\rho'_c l_c}{n_c q_c} + \frac{0{,}2\rho'_л D_л}{q_л}\right) =$$

$$= 2{,}17 \cdot 10^{-6} \frac{5650}{50 \cdot 0{,}052} \cdot \frac{4 \cdot 44}{9 \cdot 0{,}945} + \frac{0{,}2 \cdot 4 \cdot 106}{4{,}49} = 0{,}115,$$

где $\rho'_c = \rho'_л = 4$ — относительное сопротивление латуни;

$D_л = 106$ *см* — средний диаметр замыкающих колец.

12. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси в относительных единицах

$$r_{kq} \approx 0{,}75 r_{kd} = 0{,}75 \cdot 0{,}115 = 0{,}086.$$

## XXIV. Расчет пусковой характеристики (§ 12-25)

1. Постоянные коэффициенты для расчета пусковых характеристик:

$$\alpha = \frac{r_{fk}}{r_{hd}} = \frac{0{,}0242}{0{,}115} = 0{,}21; \qquad \beta = \frac{x_{fs}}{r_{fk}} = \frac{0{,}196}{0{,}0242} = 8{,}1,$$

где $r_{fk} = r_f(k+1) = 0{,}0242$; $k = 10$;

$$\gamma = \frac{x_{hd}}{x_{fs}} = \frac{0{,}0655}{0{,}196} = 0{,}334;$$

$$c_{1d} = 1 + \frac{x_s}{x_{ad}} = 1 + \frac{0{,}113}{0{,}905} = 1{,}125;$$

$$c_{1q} = 1 + \frac{x_s}{x_{aq}} = 1 + \frac{0{,}113}{0{,}44} = 1{,}257;$$

$$c_1 = \frac{c_{1d} + c_{1q}}{2} = 1{,}19.$$

2. Переменные коэффициенты (зависящие от скольжения) для расчета пусковых характеристик:

$$c_r(s) = \frac{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + \beta^2 s^2 (1 + \alpha\gamma^2)}{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2 s^2 (1+\gamma)^2} = \frac{5{,}76 + 67s^2}{33{,}2 + 116{,}5s^2};$$

$$c_x(s) = \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2\gamma s^2 (1+\gamma) + \gamma}{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 + \beta^2 s^2 (1+\gamma)^2} = \frac{22{,}60 + 29{,}53s^2}{33{,}2 + 116{,}5s^2}.$$

Результаты расчета сводим в табл. 89.

3. Ток в обмотке возбуждения в относительных единицах при пуске ($s = 1$)

$$I_f = \sqrt{(I'_a + I''_a)^2 + (I'_p + I''_p)^2}\sqrt{\frac{r^2_{kd} + (x_{hd}s)^2}{(r_{kd} + r_{fk}) + (x_{kd} + x_{fs})^2 s^2}} =$$

$$= \sqrt{(1{,}935 + 0{,}225)^2 + (3{,}46 + 0{,}5)^2}\sqrt{\frac{0{,}115^2 + 0{,}0655^2}{(0{,}115 + 0{,}0242)^2 + (0{,}0655 + 0{,}196)^2}} =$$

$$= 4{,}32 \cdot 0{,}46 = 1{,}99$$

или

$$i_f = I_f \frac{F_{1N} k_1}{w_f} = 1{,}99 \frac{5650 \cdot 0{,}85}{63{,}5} = 150\ a.$$



*Таблица 89*

**Расчетные данные для построения пусковых характеристик**

| Формулы | s=1,0 | s=0,6 | s=0,4 | s=0,2 | s=0,1 | s=0,05 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $c_r(s)$ | 0,486 | 0,395 | 0,317 | 0,222 | 0,187 | 0,177 |
| $c_x(s)$ | 0,348 | 0,44 | 0,526 | 0,63 | 0,667 | 0,68 |
| $r'_{2d}(s) = r_{kd}c_r(s)$ | 0,056 | 0,0455 | 0,0365 | 0,0256 | 0,0215 | 0,0204 |
| $x'_{2d}(s) = x_{fs}c_x(s)$ | 0,068 | 0,086 | 0,103 | 0,124 | 0,131 | 0,133 |
| $\dot z_d = r_1 c_{1d} + \frac{r'_{2d}(s)c^2_{1d}}{s} + j(x_s c_{1d} + x'_{2d}(s)c^2_{1d})$ | 0,0924 + j0,213 | 0,118 + j0,236 | 0,137 + j0,258 | 0,183 + j0,285 | 0,294 + j0,294 | 0,539 + j0,296 |
| $\dot z_q = r_1 c_{12} + \frac{r_{kq}c^2_{1q}}{s} + j(x_s c_{1q} + x_{hq}c^2_{1q})$ | 0,16 + j0,22 | 0,251 + j0,22 | 0,364 + j0,22 | 0,704 + j0,22 | 1,384 + j0,22 | 2,744 + j0,22 |
| $\dot I_{2d} = \frac{U}{\dot z_d} = I_{2da} - jI_{2dp}$ | 1,71 — j3,96 | 1,69 — j3,38 | 1,61 — j3,02 | 1,6 — j2,49 | 1,71 — j1,71 | 1,43 — j0,785 |
| $I_{2q} = \frac{U}{\dot z_q} = I_{2qa} - jI_{2qp}$ | 2,16 — j2,97 | 2,26 — j1,98 | 2,02 — j1,22 | 1,3 — j0,405 | 0,705 — j0,112 | 3,362 — j0,029 |
| $\dot I' = \frac{U}{2}\left(\frac{1}{\dot z_d} + \frac{1}{\dot z_q}\right) = I'_a - jI'_p$ | 1,935 — j3,46 | 1,975 — j2,68 | 1,815 — j2,12 | 1,445 — j1,45 | 1,207 — j0,91 | 0,896 — j0,407 |
| $\dot I'' = \frac{U}{2}\left(\frac{1}{\dot z_d} - \frac{1}{\dot z_q}\right) = I''_a - jI''_p$ | —0,225— j0,5 | —0,285— j0,7 | —0,2 — j0,9 | +0,15 — j1,04 | +0,525 — j0,8 | +0,535—j0,378 |
| $I_1 = \sqrt{0{,}5\left[\left(\frac{U}{x_d} + I_{2dp}\right)^2 + \left(\frac{U}{x_q} + I_{2qp}\right) + I^2_{2da} + I^2_{2qa}\right]}$ | 5,22 | 4,55 | 4,00 | 3,25 | 2,67 | 2,04 |
| $M = UI'_a - I'^2 r_1 c_1 + I'^2 \frac{r_1 c_1}{2s - 1}$ | 1,6 | 1,8 | 1,56 | 1,316 | 1,134 | 0,866 |

4. Ток в пусковой клетке при пуске ($s = 1$)

$$I_{kd} = \sqrt{(I'_a + I''_a)^2 + (I'_p + I''_p)^2}\sqrt{\frac{r_{fk}^2 + (x_{fs}s)^2}{(r_{kd}+r_{fk})^2 + (x_{kd}+x_{fs})^2 s^2}} =$$

$$= 4{,}32\cdot\sqrt{\frac{0{,}0242^2+0{,}196^2}{0{,}115+0{,}0242^2+(0{,}0655+0{,}196)^2}} = 2{,}97.$$

5. Средний ток в стержне пусковой клетки при пуске ($s = 1$)

$$i_{kd} = \frac{2F_{1N}I_{kd}}{n_c} = \frac{2\cdot 5650\cdot 2{,}97}{9} = 3710\ a.$$

## XXV. Расчет пусковых характеристик машины с массивными полюсами (§ 12-24, 11-20)

При наличии междуполюсных соединений принимаем параметры в продольной и поперечной оси одинаковыми.

1. Реактивное сопротивление вторичного контура при $s = 1{,}0$ по [144]

$$x_{kd}(1) \approx x_{kq}(1) = k_{xd}k_л\cdot 0{,}0483\sqrt{\frac{A}{500}\cdot\frac{k_w}{0{,}95}\frac{0{,}85\cdot10^{-4}}{B_\delta}\frac{50}{\tau}}\sqrt{\frac{1}{I_{2d}s}}.$$

В первом приближении считаем $I_{2d}=1$; при этом

$$x_{kd}(1) = 2\cdot1{,}76\cdot0{,}0483\cdot\sqrt{\frac{405}{500}\cdot\frac{0{,}895}{0{,}95}\frac{0{,}85\cdot10^{-4}}{0{,}833\cdot10^{-4}}\cdot\frac{50}{34{,}6}}\cdot 1 = 0{,}218,$$

где $k_{xd}=2$ — принято на основании опытных данных [144];

$$k_л = 1+\frac{2}{\pi}\frac{\tau}{l} = 1+\frac{2}{\pi}\cdot\frac{34{,}6}{29} = 1{,}76.$$

2. Активное сопротивление вторичного контура при $s = 1$

$$r'_{kd}\approx r'_{kq} = \frac{k_{rd}}{k_{xd}}x_{kd}(1) = \frac{3}{2}\cdot 0{,}218 = 0{,}327,$$

где $k_{rd}=3$ — принято на основании опытных данных [88].

3. Эквивалентные реактивные и активные сопротивления:

$$\frac{x_{kd}(s)}{s} = \frac{x_{kq}(s)}{s} = \frac{x_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}} = \frac{0{,}218}{\sqrt{I_{2d}s}}$$

и

$$\frac{r_{kd}(s)}{s} = \frac{r_{kq}(s)}{s} = \frac{r_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}} = \frac{0{,}327}{\sqrt{I_{2d}s}}.$$

4. Ток в продольной оси

$$\dot I_{2d} = \frac{\dot U}{\dot z_d(s)} = I_{2da} - jI_{2dp},$$

где

$$\dot z_d(s) = \left(r_1c_{1d} + \frac{r_{2d}(s)\,c_{1d}^2}{s}\right) + j\left(x_s c_{1d} + \frac{x_{2d}(s)\,c_{1d}^2}{s}\right);$$

$$\frac{r_{2d}(s)}{s} = \frac{ac+bd}{c^2+d^2};\quad \frac{x_{2d}(s)}{s} = \frac{bc+ad}{c^2+d^2};$$

$$a = \frac{r_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}}\frac{r_{fk}}{s} - \frac{x_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}}x_{fs};$$

$$b = \frac{x_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}}\frac{r_{fk}}{s} + \frac{r_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}}x_{fs};$$

$$c = \frac{r_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}} + \frac{r_{fk}}{s};\quad d = \frac{x_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}} + x_{fs}.$$



5. Ток в поперечной оси

$$\dot I_{2q} = \frac{\dot U}{\dot z_q(s)} = I_{2qa} - jI_{2qp},$$

где

$$\dot z_q(s) = \left(r_1c_{1q} + \frac{r_{kq}(1)\,c_{1q}^2}{\sqrt{I_{2q}s}}\right) + j\left(x_sc_{1q} + \frac{x_{1q}(1)\,c_{1q}^2}{\sqrt{I_{2q}s}}\right).$$

6. Вращающий момент

$$M = \frac{U}{2}(I_{2da}+I_{2qa}) - \frac{1}{2}[(I_{2da}^2+I_{2dp}^2)\,r_1c_{1d} + (I_{2qa}^2 + I_{2qp})\,r_1c_{1q}].$$

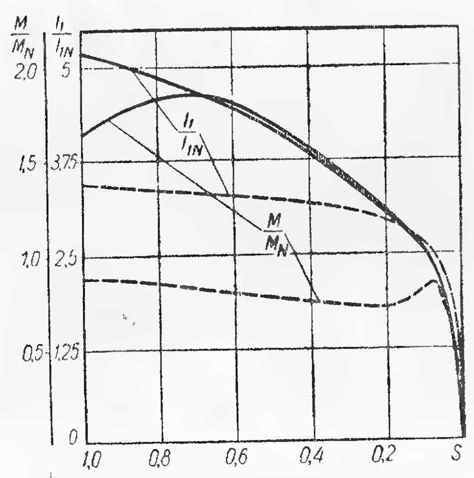



Рис. 289. Пусковые характеристики синхронного двигателя 560 *квт*, 6000 *в*, 600 об/мин.
——— нормальная клетка;
— — — — массивные полюса.

7. Полный пусковой ток

$$I_1 = \sqrt{0{,}5\left[\left(I_{2dp}+\frac{U}{x_d}\right)^2 + \left(I_{2qp}+\frac{U}{x_q}\right)^2 + I_{2da}^2 + I_{2qa}^2\right]}.$$

8. Результаты расчета сводим в табл. 90.

По результатам расчета в XXIV и XXV построены пусковые характеристики двигателя (рис. 289).

## XXVI. Механический расчет

1. Расчет вала. Наибольший крутящий момент, передаваемый валом двигателя (с учетом перегрузок)

$$M_{кр\,max} = 97\,500\frac{P_{2N}}{n_N}k_{пер} = 97\,500\cdot\frac{560}{600}\cdot2{,}5 = 228\,000\ кгсм,$$

где $k_{пер}=2{,}5$ — перегрузочная способность синхронного двигателя.

Минимальный диаметр вала (выступающий конец вала со стороны привода)

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{M_{кр\,max}}{0{,}2\tau_{доп}}} = \sqrt[3]{\frac{228\,000}{0{,}2\cdot600}} = 12{,}45\ см,$$

где $\tau_{доп}=600$ *кг/см²* — допустимое касательное напряжение для стали марки Ст. 5.

*Таблица 90*

**Данные расчета пусковых характеристик**

| Формулы | $s = 1,0$ | $s = 0,6$ | $s = 0,4$ | $s = 0,2$ | $s = 0,1$ | $s = 0,05$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{r_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}}$ (1) | 0.327 | 0,421 | 0,516 | 0.732 | 1.035 | 1,461 |
| $\frac{x_{kd}(1)}{\sqrt{I_{2d}s}}$ (2) | 0,218 | 0,281 | 0,344 | 0.488 | 0,69 | 0,974 |
| $\frac{r_{fk}}{s}$ (3) | 0,0242 | 0.040 | 0.060 | 0.121 | 0,242 | 0,434 |
| $x_{fs}$ (4) | 0,196 | 0,196 | 0,196 | 0.196 | 0.196 | 0,196 |
| $a = (1) \cdot (3) - (2) \cdot (4)$ | —0.0349 | —0,0381 | —0.0372 | —0,0105 | 0,115 | 0,515 |
| $b = (2) \cdot (3) + (1) \cdot (4)$ | 0.0693 | 0.0938 | 0,1216 | 0,202 | 0.37 | 0,756 |
| $c = (1) + (3)$ | 0,351 | 0.462 | 0,577 | 0.851 | 1,275 | 1,944 |
| $d = (2) + (4)$ | 0,414 | 0,477 | 0,54 | 0,684 | 0,866 | 1,18 |
| $\frac{r_{2d}(s)}{s} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2}$ | 0,0558 | 0,061 | 0,0735 | 0.108 | 0,193 | 0.368 |
| $\frac{x_{2d}(s)}{s} = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}$ | 0,132 | 0,139 | 0,145 | 0,204 | 0,123 | 0.165 |
| $\dot{z}_d(s)$ | 0.0919 + + j0,293 | 0.0984 + + j0.302 | 0,1139 + + j0,31 | 0,1574 + + j0,384 | 0,264 + + j0,282 | 0.471 + + j0,334 |
| $\frac{U}{\dot{z}_d(s)}$ | 0.97 — — j3,12 | 0.984 — — j3,02 | 1,045 — — j2,85 | 0.92 — — j0,224 | 1.77 — — j1,88 | 1,45 — — j1,03 |
| $\frac{r_{kq}(1)}{\sqrt{I_{2q}s}}$ | 0,327 | 0,422 | 0,517 | 0,73 | 1,033 | 1,46 |
| $\frac{x_{kq}(1)}{\sqrt{I_{2q}s}}$ | 0,218 | 0,281 | 0,344 | 0,488 | 0,69 | 0,974 |
| $\dot{z}_q(s)$ | 0.542 + + j0,486 | 0.691 + + j0,445 | 0,644 + + j0,687 | 1,174 + + j0,916 | 1,659 + + j1,251 | 2,324 + + j1.682 |
| $\frac{U}{\dot{z}_q(s)}$ | 1,02 — — j0,92 | 0,87 — — j0.72 | 0,72 — — j0,59 | 0.494 — — j0,38 | 0.39 — — j0,29 | 0.285 — — j0,206 |
| $M$ | 0,858 (1.26) | 0,804 (1,105) | 0,774 (0,905) | 0,64 (0.937) | 1,006 (1.00) | 0,832 (0,825) |
| $I_1$ | 3,62 (4,16) | 3,5 (3,74) | 3,32 (3,54) | 3,05 (3,24) | 2,82 (2,76) | 2,27 (2,24) |

Примечания: 1. При расчете параметров принято $I_{2d} = I_{2q} = 1$.
2. Цифры в скобках даны с учетом зависимости параметров от тока.



Принимаем $d_{min} = 13$ *см*.

Реакции опор от веса ротора и силы одностороннего магнитного притяжения: опора $A$

$$R_A = \frac{G_{рот} + P_\delta}{\overline{AB}} \cdot \overline{BO} = \frac{2620 + 2240}{134} \cdot 77 = 2810 \text{ кг};$$

опора $B$

$$R_B = \frac{G_{рот} + P_\delta}{\overline{AB}} \cdot \overline{AO} = \frac{2620 + 2240}{134} \cdot 57 = 2070 \text{ кг},$$

где $G_{рот} = 2620$ *кг* — суммарный вес ротора (по эскизу ротора);

$P_\delta = 3,5 \frac{Dl}{\delta} e_0 = 3,5 \frac{110 \cdot 29}{0,7} 0,14 = 2240$ *кг* — сила одностороннего магнитного притяжения;

$e_0 = 0,14$ — наибольший начальный эксцентриситет вала;

$\overline{AB} = 134$ *см*; $\overline{AO} = 57$ *см*; $\overline{BO} = 77$ *см* — по эскизу вала (рис. 290).

Максимальный изгибающий момент в опасном сечении вала

$$M_{изг\,max} = R_A \cdot \overline{AO} = R_B \cdot \overline{BO} = 2810 \cdot 57 = 160\,000 \text{ кгсм}.$$

Наибольшее напряжение от изгиба на диаметре вала $d = 20$ *см* (смотри эскиз вала и эпюру моментов на рис. 291)

$$\sigma_{\infty нб} = k_\sigma \frac{M_{изг\,max}}{W_{изг}} = 1,5 \frac{160\,000}{785} = 306 \text{ кг/см}^2,$$

где $k_\sigma = 1,5$ — коэффициент концентрации изгибающих напряжений;

$W_{изг} = \frac{\pi}{32} d^3 = 785$ *см*$^3$.

Наибольшее касательное напряжение в опасном сечении вала

$$\tau_{нб} = k_\tau \frac{M_{кр\,max}}{W_{кр}} = 1,5 \cdot \frac{228\,000}{1570} = 218 \text{ кг/см}^2,$$

где $k_\tau = 1,5$ — коэффициент концентрации напряжений кручения;

$$W_{кр} = \frac{\pi}{16} d^3 = 1570 \text{ см}^3.$$

Комбинированное напряжение в опасном сечении вала

$$\sigma_к = \sqrt{\sigma^2_{\infty нб} + 4\tau_{нб}^2} = \sqrt{306^2 + 4 \cdot 218^2} = 534 \text{ кг/см}^2.$$

Коэффициент загрузки по отношению к пределу усталости при переменном цикле

$$\varphi = \frac{\sigma_к}{\sigma'_\omega} = \frac{534}{2000} = 0,267,$$

где $\sigma'_\omega = 2000$ *кг/см*$^2$ — предел усталости для стали марки Ст. 5. Должно быть $\varphi \leqslant 0,5 \div 0,6$.

2. Расчет полюсов. Центробежная сила, действующая на полюс ротора

$$\frac{(G'_m + G_{kp} + G_к)}{g} \omega^2 R_{ц.\,т} = \frac{84,9 + 34,2 + 3,1}{981} \cdot 62,8^2 \cdot 43,4 = 21\,200 \text{ кг},$$

где $G_m = 84,9$ *кг* — вес полюса со щеками;
$G_{kp} = 34,2$ *кг* — вес катушки полюса;
$G_к = 3,1$ *кг* — вес пусковой клетки на полюс;
$R_{ц.\,т} = 43,4$ *см* — радиус центра тяжести полюса с катушкой.

Рис. 290. Вал.

Рис. 291. Эпюра моментов на валу.



Полюс к ярму крепится с помощью хвоста (рис. 288). Напряжение на разрыв в наиболее узком сечении хвоста от центробежных сил (сечение $a—a'$)

$$\sigma_z = \frac{P_{\omega p}}{\overline{aa'} \cdot l_p \cdot \varphi_{Fem}} = \frac{21\,200}{4{,}5 \cdot 29 \cdot 0{,}97} = 170 \ кг/см^2,$$

где $\overline{aa'} = 4{,}5$ *см.*

Центробежная сила, действующая на катушку полюса,

$$P_{\omega к} = \frac{G_{кр}}{g}\,\omega^2 R_{ц.\ т} = \frac{34{,}2}{981} \cdot 62{,}8^2 \cdot 43{,}4 = 5900 \ кг.$$

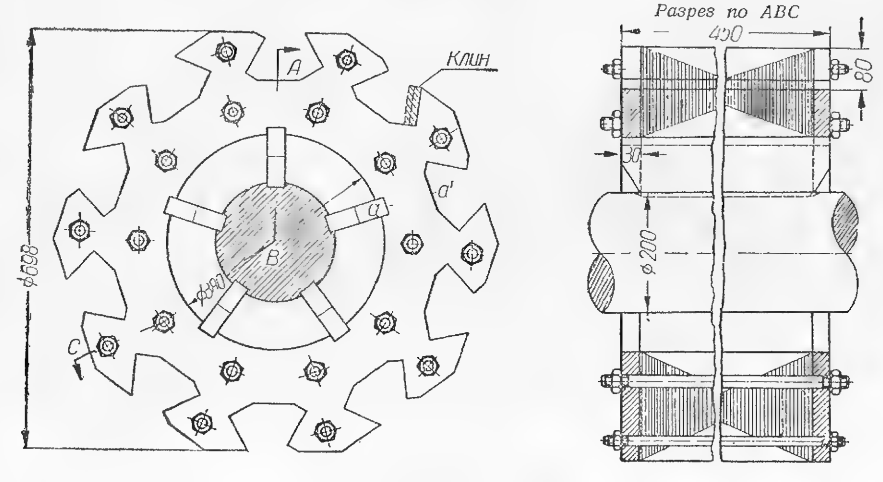



Рис. 292. Ярмо ротора.

Напряжение на срез полюсного башмака (сечение $b — b'$ на эскизе полюса)

$$\sigma_{ср} = \frac{P_{\omega к}}{2h_p'' l_p \varphi_{Fem}} = \frac{5900}{2 \cdot 3{,}2 \cdot 29 \cdot 0{,}97} = 324 \ кг/см^2,$$

где $h_p'' = 3{,}2$ *см.*

Усилие прессовки полюсного сердечника

$$P_{пр} = p_{пр} S_p = 12 \cdot 365 = 4360 \ кг,$$

где $p_{пр} = 12$ *кг/см²* — удельное давление при прессовке.

Берем по семь заклепок диаметром $d_з = 1{,}2$ *см* на полюс. Напряжение на растяжение в заклепках

$$\sigma_з = \frac{P_{пр}}{n_з \frac{\pi}{4} d_з^2} = \frac{4360}{7 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1{,}2^2} = 560 \ кг/см^2.$$

Допустимое напряжение на растяжение для стали марки Ст. 15 $R_z = 1000$ *кг/см²*.

3. Расчет обода (ярма) ротора (рис. 292). Центробежная сила от собственного веса обода

$$P_{\omega об} = \frac{G_{об}}{g}\,\omega^2 R_{ц.\ об} = \frac{1070}{981} \cdot 62{,}8^2 \cdot 32 = 138\,000 \ кг,$$

где $R_{ц.\,об.} = 32$ *см* — радиус инерции обода;

$G_{об} = (D_{j2} + h_{j2})\, h_{j2} l_{j2} \varphi_{Fem} \gamma_{Fe} = \pi (38 + 16) \cdot 16 \cdot 45 \cdot 0.97 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 1070$ *кг*.

$l_{j2} = 45$ *см* — полная длина ярма ротора.

Растягивающее радиальное усилие обода от собственного веса

$$C_{\omega об} = \frac{P_{\omega об}}{2\pi} = \frac{138\,000}{2\pi} = 22\,100 \text{ кг}.$$

Растягивающее радиальное усилие от веса полюсов

$$C_{\omega p} = \frac{2pP_{\omega p}}{2\pi} = \frac{21\,200}{2\pi} = 33\,800 \text{ кг}.$$

Сечение обода по $cc'$ (рис 284)

$$Q_{об} = \overline{cc'} \cdot l_{j2} \varphi_{Fem} = 8 \cdot 45 \cdot 0{,}97 = 348 \text{ см}^2.$$

Напряжение в опасном сечении обода

$$\sigma_{об} = \frac{c_{\omega об} + c_{\omega p}}{Q_{об}} = \frac{22\,100 + 33\,800}{348} = 160 \text{ кг/см}^2.$$

4. Определение махового момента $GD_p^2$: полюсов с обмоткой возбуждения

$$GD_p^2 = 2p\,(G_p' + G_{kp} + G_{ст})\, D_p^2 = 10 \cdot (84{,}9 + 34{,}2 + 3{,}1) \cdot 0{,}868^2 = 920 \text{ кгм}^2$$

замыкающих колец пусковой клетки

$$GD_{кл}^2 = 2G_{кл}\, D_{кл}^2 = 25{,}4 \cdot 1{,}06^2 = 28 \text{ кгм}^2;$$

ярма (обода) ротора

$$GD_{j2}^2 = G_{j2}\, D_{j2\,ср}^2 = 1070 \cdot 0{,}54^2 = 310 \text{ кгм}^2.$$

Суммарный маховой момент ротора

$$GD^2 = GD_p^2 + GD_{кл}^2 + GD_{j2}^2 = 920 + 28 + 310 = 1260 \text{ кгм}^2.$$

5. Инерционная постоянная

$$T_i = \frac{1}{4}\frac{GD^2\omega^2}{P_N} = \frac{1}{4}\frac{1260 \cdot 62{,}8^2}{750 \cdot 10^3} = 1{,}65 \text{ сек.}$$

## Пример 3

### Расчет турбогенератора

### I. Проектное задание (§ 12-28)

1. Мощность $P_{2N} = 30\,000$ *квт*, $P_N = 37\,500$ *ква*.
2. Напряжение $U_{лN} = 10\,500$ *в*.
3. Коэффициент мощности $\cos\varphi_N = 0{,}8$ (отстающий).
4. К. п. д. $\eta = 98\%$.
5. О. к. з. $\frac{1}{x_d} = 0{,}65$.
6. Частота $f = 50$ *гц*.
7. Скорость вращения $n = 3000$ об/мин.
8. Условия нагрузки — продолжительная.
9. Охлаждение — водородное (давление 1,05 *ата*).

По всем данным машина должна соответствовать ГОСТ на турбогенераторы.



### II. Дополнительные расчеты к проектному заданию и оценка заданного к. п. д.

1. Фазный ток

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_{лN}} = \frac{37\,500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10\,500} = 2060 \text{ а}.$$

2. Число полюсов генератора

$$2p = 2\,\frac{f}{n} = \frac{2 \cdot 50}{50} = 2.$$

3. К. п. д. (без добавочных и механических потерь)

$$\eta_э \approx 1 - k_э \left(\frac{2p}{P_{2N}}\right)^{\frac{1}{4}} = 1 - \left(\frac{2}{30\,000 \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{4}} = 0{,}984 = 98{,}4\%.$$

4. Добавочные потери по § 12-23

$p_{доб} = 0{,}004P_{2N}$.

5. Механические потери при водородном охлаждении

$$p_m \approx 0{,}002P_{2N} = 60 \text{ квт}.$$

6. К. п. д. с учетом добавочных и механических потерь

$$\eta = 0{,}984 - 0{,}004 - 0{,}002 = 0{,}978,$$

т. е. близкий к заданному.

### III. Выбор основных размеров машины (§ 12-30)

Сначала определяются ориентировочные величины, а затем уточняются с учетом различных условий. Окончательно принятые значения даны в тексте жирным шрифтом.

*Первый метод*

1. Принимаем коэффициент $\beta = \frac{\tau}{l_i} = 0{,}6$ (рис. 273).
2. Принимаем коэффициент глубины паза $\lambda_1 = 0{,}12$ (стр. 726).
3. Универсальную машинную постоянную при напряжении $U_{лN} = 10{,}5$ *кв*

принимаем по табл. $2C_s \approx 4{,}15$ *смдж*. $^{-\frac{1}{4}}$.

4. Полюсное деление статора

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P_N\beta}{2pf\sqrt{2}\lambda_1}} = 4{,}15 \sqrt[4]{\frac{37\,500 \cdot 10^3\ 0{,}6}{2 \cdot 50\sqrt{2} \cdot 0{,}12}} = 140{,}5 \text{ см}.$$

5. Диаметр расточки статора

$$D = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{2 \cdot 140{,}5}{\pi} = 89{,}5 \text{ см}.$$

Предельный диаметр по условиям допустимой окружной скорости

$$D_{max} = \frac{v_{max}}{\pi n} = \frac{160\ \ 100}{\pi 50} = 102 \text{ см},$$

где $v_{max} = 160$ *м/сек*.

6. Расчетная длина статора

$$l_i = \frac{\tau}{\beta} = \frac{140{,}5}{0{,}6} = 235 \text{ см}.$$

**7. Высота** паза статора

$$h_п = \tau\lambda_1 = 140{,}5 \cdot 0{,}12 = 16{,}8 \text{ см}.$$

*Второй метод*

8. Машинная постоянная Арнольда по рис. 274

$$C_A = 2{,}6\ см^3 \cdot дж^{-1}.$$

9. Диаметр расточки статора

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_N\, 2p\beta}{\pi n}\, C_A} = \sqrt[3]{\frac{37\,500 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0{,}6}{\pi \cdot 50} \cdot 2{,}6} = 91\ см.$$

С целью получить минимальный диаметр поковки принимаем $D = 87{,}5$ *см.*

10. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{87{,}5\pi}{2} = 137\ см.$$

11. Пересчитываем длину

$$l_i = 235 \cdot \left(\frac{89{,}5}{87{,}5}\right)^2 = 247\ см.$$

Принимаем $l_i = 249$ *см* (уточняем ниже при выборе числа каналов).

12. Воздушный зазор и диаметр ротора (ориентировочно)

$$\delta = 0{,}35\sqrt{D} = 0{,}35\sqrt{87{,}5} = 3{,}3\ см;$$

$$D_R = 2D - 2\delta = 87{,}5 - 2{,}33 = 80{,}9\ см.$$

Эти данные удовлетворительно соответствуют данным построенных турбогенераторов (табл. 85).

## IV. Выбор обмотки и числа пазов статора (§ 12-31)

Выбираем двухслойную обмотку с укороченным шагом $y \approx 0{,}8$. Изоляция обмотки компаундированная. Для крупных турбогенераторов число активных стержней в пазу $s'_п = 2$.

1. Основная волна индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta_1} = 0{,}8 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2.$$

2. Магнитный поток основной волны

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta_1} \tau l_i = 0{,}636 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 137 \cdot 249 = 1{,}75\ вб.$$

3. Число витков на фазу (четное число)

$$w = \frac{U_{\Phi N}}{\pi\sqrt{2} f k_w \Phi_1} = \frac{6060}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}75} = 18{,}8,$$

где $k_w = 0{,}9$ — обмоточный коэффициент $\left(k_w = \frac{3}{\pi} \sin 90 \cdot 0{,}8 \approx 0{,}9\right)$. Принимаем $w = 18$.

4. Число пазов на полюс и фазу при числе параллельных ветвей $a = 1$.

$$q = \frac{aw}{ps'_п} = \frac{18}{2} = 9.$$

5. Число пазов статора

$$Z_1 = 6pq = 6 \cdot 9 = 54.$$

6. Зубцовый шаг статора

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 87{,}5}{54} = 5{,}09\ см.$$

7. Ширина паза статора (ориентировочно)

$$b_п = t_1 \lambda = 5{,}09 \cdot 0{,}5 = 2{,}5\ см,$$

где $\lambda = \frac{b_п}{t_1} = 0{,}5.$



8. Сечение фазного проводника обмотки статора

$$q_\Phi = \frac{I_N}{as} = \frac{2060}{350} = 5{,}9\ см^2,$$

где $s = 350$ *а/см²* — плотность тока, принята согласно табл. 83.

## V. Наружный диаметр и полная длина статора (§ 12-32)

1. Высота ярма

$$h_j = \frac{\Phi}{2 l_i \varphi_{Fe} B_{j_1}} = \frac{1{,}75}{2 \cdot 249 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-4}} = 30{,}2\ см,$$

где принято

$$B_{j_1} = 1{,}3 \cdot 10^{-4}\ вб/см^2;$$

$$\varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i} \approx 0{,}85.$$

2. Наружный диаметр железа

$$D_{j_1} = D + 2(h_п + h_j) = 87{,}5 + 2(16{,}2 + 30{,}2) = 180{,}9\ см.$$

Округляем до диаметра заводских серий (табл. 85)

$$D_{j_1} = 180\ см.$$

3. Число вентиляционных каналов при ширине пакета $l' = 3{,}85$ *см* и ширине канала $b_s = 1$ *см*

$$n_s = \frac{l_i - l'}{0{,}5 b_s + l'} = \frac{249 - 3{,}85}{0{,}5 + 3{,}85} \approx 56.$$

4. Полная длина железа

$$l = l'(n_s + 1) + n_s b_s = 3{,}85 \cdot 57 + 56 = 276\ см.$$

5. Длина чистого железа

$$l_{Fe} = l'(n_s + 1) k_п = 3{,}85(56 + 1) \cdot 0{,}93 = 204\ см,$$

где $k_п = 0{,}93$.

6. Уточняем расчетную длину статора

$$l_i = l'(n_s + 1) + 0{,}5 n_s b_s = 3{,}85 \cdot 57 + 0{,}5 \cdot 56 = 248\ см.$$

## VI. Обмотка и пазы статора. Уточнение основных параметров (§ 12-31)

Выше определено, что число витков на фазу $w = 18$, а число последовательно соединенных проводников в пазу $s_п = 2$ каждый сечением около 600 *мм²*.

Исходя из допустимых вихревых токов, каждый проводник разбиваем на 42 элементарных (21 по высоте и 2 по ширине), так как максимально допустимое сечение элементарного проводника должно быть не больше 16 *мм²*. Делаем полную транспозицию (плетеный стержень, рис. 37). Выбираем проводники марки ПДА по сортаменту. Размеры проводника: голого $a \times b = 2{,}44 \times 5{,}9$ **мм**; изолированного $a' \times b' = 2{,}74 \times 6{,}2$ **мм**.

1. Сечение фазного проводника при $a = 1$

$$q_\Phi = 21 \cdot 2 \cdot 0{,}133 = 5{,}84\ см^2.$$

2. Составляем спецификацию паза статора по заводской нормали и вычерчиваем паз в масштабе (рис. 293):

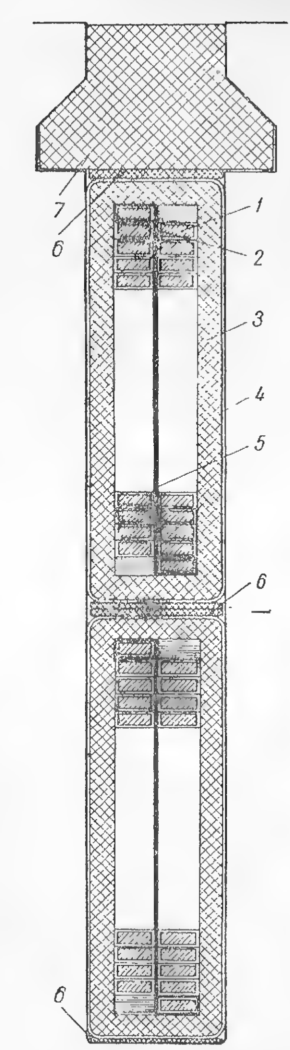


Рис. 293. Паз статора.

| | Наименование | Размеры по ширине паза (в *мм*) | Размеры по высоте паза (в *мм*) |
|---|---|---|---|
| 1. | Проводники марки ПДА 2,44 × 5,9 | 6,2 × 2 = 12,4 | 2,74 × 22 × 2 = 120,5 |
| 2. | Изоляция крайних проводников стержня: микалента ЛМЧ-11 0,17 × 20 *мм* (ГОСТ 7019—54) один слой впритык | | 0,17 × 2 × 4 = 1,36 |
| 3. | Изоляция стержня: микалента ЛМ4-4 0,13 × 35 *мм* (ГОСТ 4268—48) 16 слоев вполнахлеста | 0,13 × 16×4=8,35 | 0,13 × 16 × 4×2 = 16,7 |
| 4. | Изоляция стержня: лента асбестовая 0,5 × 30 *мм* (ТУНКХП № 147-11) один слой впритык | 0,5 × 2 = 1 | 0,5 × 2 × 2 = 2,0 |
| 5. | Прокладка между проводниками стержня по высоте: миканит 0,5 *мм* | 0,5 | |
| 6. | Прокладки по высоте паза: электрокартон ЭВ-0,5 1 *мм* | | 2 + 1 + 0,5 = 3,5 |
| 7. | Клин гетинаксовый | | 25 |
| 8. | Разбухание при компаундировании | 0,3 | 0,3 × 2 = 0,6 |
| 9. | Допуск на укладку | 0,4 | 0,3 |

Размеры паза в свету:

высота паза $h_п = 17$ *см*;

ширина паза $b_п = 2,3$ *см*.

3 Полюсное деление статора в пазах

$$\tau_п = mq = 3 \cdot 9 = 27.$$

4. Шаг обмотки по пазам

$$y_п = 21$$

(из 1-го паза в 22-й).

5. Относительный шаг обмотки статора

$$y = \frac{y_п}{\tau_п} = \frac{21}{27} = 0,78.$$

6. Коэффициент укорочения обмотки

$$k_у = \sin\frac{\pi}{2}\cdot y = \sin(90° \cdot 0,78) = 0,94.$$

7. Коэффициент распределения обмотки

$$k_р = \frac{\sin 30°}{q \sin\frac{30°}{q}} = \frac{0,5}{9\sin\frac{30°}{9}} = 0,96.$$

8. Обмоточный коэффициент

$$k_w = k_у k_р = 0,94 \cdot 0,96 = 0,9.$$

9. Средняя длина лобовой части обмотки статора по приложению VI

$$l_л = \frac{\pi(D + h_п)\,y}{2p\sqrt{1 - \left(\frac{b_п + s_i}{t_1}\right)^2}} + \pi\left(r_1 + \frac{h_п}{4}\right) + 2A =$$

$$= \frac{\pi(87,5 + 17)\,0,78}{2\sqrt{1 - \left(\frac{2,3 + 1}{5,09}\right)^2}} + \pi\left(2,5 + \frac{17}{4}\right) + 13 = 203\ \textit{см}.$$



10. Длина витка обмотки статора

$$l_w = 2(l_л + l) = 2(203 + 276) = 958\ \textit{см}.$$

11. Сопротивление обмотки статора при различных температурах

$$r_{15} = \rho_{15}\frac{l_w w}{q_ф} = 1,75 \cdot 10^{-6}\,\frac{958 \cdot 18}{5,84} = 0,00515\ \textit{ом};$$

$$r_{75} = 1,24 r_{15} = 1,24 \cdot 0,00515 = 0,0064\ \textit{ом};$$

$$r_{100} = 1,34 r_{15} = 1,34 \cdot 0,00515 = 0,0069\ \textit{ом}.$$

## VII. Уточнение расчетных величин

1. Коэффициент

$$\beta = \frac{\tau}{l_i} = \frac{137}{248} = 0,552.$$

2. Коэффициент глубины паза

$$\lambda_1 = \frac{h_п}{\tau} = \frac{17}{137} = 0,124.$$

3. Универсальная машинная постоянная

$$C_s = 4,15\left(\frac{0,124 \cdot 0,55}{0,12 \cdot 0,552}\right)^{\frac{1}{4}} = 4,18.$$

4. Коэффициент заполнения паза медью

$$\varphi_{Cu} = \frac{s'_п q_ф}{a h_п b_п} = \frac{2 \cdot 5,84}{1 \cdot 17 \cdot 2,3} = 0,3.$$

5. Коэффициент заполнения железа

$$\varphi_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{l_i} = \frac{203}{276} = 0,74.$$

6. Отношение ширины паза к зубцовому шагу

$$\lambda = \frac{b_п}{t_1} = \frac{2,3}{5,09} = 0,452.$$

7. Плотность тока в обмотке статора

$$s = \frac{I_N}{q_ф} = \frac{2060}{5,84} = 353\ \textit{а/см}^2.$$

8. Линейная нагрузка статора

$$A = \frac{s'_п I_N}{a t_1} = \frac{2 \cdot 2060}{5,09} = 814\ \textit{а/см}.$$

9. Магнитный поток

$$\Phi_1 = \frac{U_{Nф}}{4,44 f k_w w} = \frac{6060}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 18} = 1,7\ \textit{вб}.$$

10. Индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta_1} = \frac{\pi}{2}\,\frac{\Phi_1}{\tau l_i} = \frac{1,57 \cdot 1,7}{137 \cdot 248} = 0,79 \cdot 10^{-4}\ \textit{вб/см}^2.$$

## VIII. Воздушный зазор (§ 12-32).

1. Приведенный воздушный зазор машины

$$\delta' \approx \frac{\mu_0 F_{1N}}{B_{\delta_1} x_d} = \frac{0,4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 45\,000 \cdot 0,55}{0,78 \cdot 10^{-4}} = 4 \text{ см},$$

где $F_{1N} = \frac{1,35}{p} k_w w I_N = 1,35 \cdot 0,9 \cdot 18 \cdot 2060 = 45\,000$ $a$;

$\frac{1}{x_d}$ — выбираем минимально допустимым: $\frac{1}{x_d}$ = о. к. з. = 0,55.

2. Действительный воздушный зазор

$$\delta = \frac{\delta'}{k_C} = \frac{4}{1,2} = 3,32 \text{ см},$$

где $k_C \approx 1,2$.

Принимаем $\delta = 3,3$ *см*.

Коэффициент Картера для статора

$$k_{C_1} = \frac{t_1}{t_1 - b_1} = \frac{5,09}{5,09 - 0,275} = \mathbf{1,06},$$

где

$$b_1 = b_п \cdot \frac{b_п}{5\delta + b_п} = 2,3 \frac{2,3}{5 \cdot 3,3 + 2,3} = 0,275.$$

## IX. Расчет основных размеров ротора (§ 12-33)

1. Внешний диаметр

$$D_R = D - 2\delta = 87,5 - 2 \cdot 3,3 = 80,9 \text{ см}.$$

2. Длина бочки

$$l_R = 280 \text{ см}.$$

3. Число зубцовых делений и число пазов из условий кривой поля (по табл. 84).

$$N_R = 42; \quad Z_R = 32;$$

отношение

$$\gamma = \frac{Z_R}{N_R} = \frac{32}{42} = 0,762.$$

4. Зубцовый шаг ротора по внешнему диаметру

$$t_R = \frac{\pi D_R}{N_R} = \frac{\pi \cdot 80,9}{42} = 6,05 \text{ см}.$$

5. Ширина паза

$$b_{пR} \approx 0,4 t_R = 0,4 \cdot 6,05 = 2,42 \text{ см}.$$

Принимаем

$$b_{пR} = 2,5 \text{ см}.$$

6. Высота и ширина паза ротора уточняются после расчета м. д. с. и обмотки возбуждения, а также после проверки на механическую прочность зубца.

По условиям механической прочности минимальная ширина зуба ротора у основания паза $b_{ZR\,\min} \geqslant 1,35$ *см* [51], откуда

$$t_{R\,\min} = b_{пR} + b_{ZR\,\min} = 2,5 + 1,35 = 3,85 \text{ см},$$

и

$$h_{пR} = \frac{\pi D_R t_{R\min} N_R}{\pi} = 80,9 - \frac{3,85}{\pi} \cdot 42 = 14,65 \text{ см}.$$

При расчете магнитной цепи принимаем $h_{пR} = 15$ *см*.



7. Коэффициент Картера для ротора

$$k_{C_2} = \frac{t_R}{t_R - b_2} = \frac{6,05}{6,05 - 0,32} = 1,06,$$

где

$$b_2 = b_{пR} \frac{b_{пR}}{5\delta + b_{пR}} = 2,5 \cdot \frac{2,5}{5 \cdot 3,3 + 2,5} = 0,32.$$

8. Приведенный коэффициент Картера

$$k_C = k_{C_1} k_{C_2} \gamma + k_{C_1}(1 - \gamma) =$$
$$= 1,06 \cdot 1,06 \cdot 0,762 + 1,06(1 - 0,762) = \mathbf{1,1}.$$

9. Диаметр центрального отверстия ротора

$$d_0 = \mathbf{10 \text{ см}}.$$

## X. Магнитная цепь (§ 12-34)

1. Зубцовые шаги статора (рис. 275):

по диаметру расточки статора

$$t_1 = 5,09 \text{ см};$$

по окружности, проходящей через половину высоты зубца

$$t_{12} = \frac{\pi(D + h_п)}{Z_1} = \frac{\pi(87,5 + 17)}{54} = 6,08 \text{ см};$$

по окружности, проходящей через основание паза статора

$$t_{13} = \frac{\pi(D + 2h_п)}{Z_1} = \frac{\pi(87,5 + 2 \cdot 17)}{54} = 7,02 \text{ см}.$$

2. Ширина зубца статора в различных сечениях:

по диаметру расточки

$$b_{z_1} = t_1 - b_п = 5,09 - 2,3 = 2,79 \text{ см};$$

на половине высоты зубца

$$b_{z_{12}} = t_{12} - b_п = 6,08 - 2,3 = 3,78 \text{ см};$$

у основания зубца

$$b_{z_{13}} = t_{13} - b_п = 7,02 - 2,3 = 4,72 \text{ см}.$$

3. Высота ярма статора

$$h_j = \frac{D_j - D}{2} - h_п = \frac{180 - 87,5}{2} - 17 = 29,2 \text{ см}.$$

4. Средняя длина магнитных силовых линий в статоре:

в зубцах

$$L_{z_1} = 2h_п = 34 \text{ см};$$

в ярме

$$L_{j_1} = \frac{\pi(D_j - h_j)}{2p} = \frac{\pi(180 - 29,2)}{2} = 236 \text{ см}.$$

5. Приведенный воздушный зазор

$$\delta' = k_C \delta = 1,1 \cdot 3,3 = 3,63 \text{ см}.$$

6. Коэффициент площади малых зубцов ротора

$$K = \frac{1 - \cos\frac{\pi}{2}\gamma}{\frac{\pi}{2}\gamma} = \frac{1 - \cos(90^\circ \cdot 0,762)}{1,57 \cdot 0,762} = 0,53.$$

7. Расчетная площадь малых зубцов в различных сечениях ротора: по внешнему диаметру

$$S'_{zR_1} = \frac{Z_R}{2p} l_R b_{zR_1} K = \frac{32}{2}\cdot 280\cdot 3{,}55\cdot 0{,}53 = 8450\ см^2,$$

где

$$b_{zR_1} = t_R - b_{пR} = 6{,}05 - 2{,}5 = 3{,}55\ см;$$

на половине высоты вентиляционного паза в большом зубе

$$S'_{zR_2} = S'_{zR_1}\frac{b_{zR_2}}{b_{zR_1}} = 8450\cdot\frac{2{,}65}{3{,}55} = 6300\ см^2,$$

где

$$b_{zR_2} = t_{R_2} - b_{пR} = 5{,}15 - 2{,}5 = 2{,}65\ см;$$

у основания вентиляционного паза

$$S'_{zR_3} = S'_{zR_1}\frac{b_{zR_3}}{b_{zR_3}} = 8450\cdot\frac{1{,}75}{3{,}55} = 4160\ см^2,$$

где

$$b_{zR_3} = t_{R_3} - b_{пR} = 4{,}25 - 2{,}5 = 1{,}75\ см;$$

$$t_{R_3} = \frac{\pi(D_R - 2h_{п.\ в})}{N_R} = \frac{\pi(80{,}9 - 2\cdot 12)}{42} = 4{,}25\ см;$$

на расстоянии $0{,}5(h_{пR} - h_{пв})$ от основания малого зубца

$$S'_{zR_4} = S'_{zR_1}\frac{b_{zR_4}}{b_{zR_1}} = 8450\,\frac{1{,}53}{3{,}55} = 3640\ см^2,$$

где

$$b_{zR_4} = \frac{\pi[D_R - 2h_{пв}) - (h_{пR} - h_{пв})]}{N_R} - b_{пR} = \frac{\pi(80{,}9 - 2\cdot 12 - 3)}{42} - 2{,}5 = 1{,}53\ см,\ t_{R_4} = 4{,}03\ см;$$

у основания зубца

$$S'_{zR_5} = S'_{zR_1}\frac{b_{zR_5}}{b_{zR_1}} = 8450\cdot\frac{1{,}3}{3{,}55} = 3100\ см^2,$$

где

$$b_{zR_5} = \frac{\pi(D_R - 2h_{пR})}{N_R} - b_{пR} = t_{R_5} - b_{пR} = \frac{(80{,}9 - 2\cdot 15)}{42} - 2{,}5 = 1{,}3\ см.$$

8. Расчетная площадь большого зуба ротора в различных сечениях: по внешнему диаметру

$$S''_{zR_1} = \left(\frac{N_R - Z_R}{2p}t_R - n_R b_{пR}\right) l_R = \left(\frac{42-32}{2}\cdot 6.05 - 2\cdot 2{,}5\right)280 = 7060\ см^2,$$

где $n_R = 2$ — число аксиальных вентиляционных каналов;

на половине высоты вентиляционного паза

$$S''_{zR_2} = \left(\frac{N_R - Z_R}{2p}t_{R_2} - n_R b_{пR}\right) l_R = \left(\frac{42-32}{2}\cdot 5{,}15 - 2\cdot 2{,}5\right)280 = 5800\ см^2;$$

у основания вентиляционного паза

$$S''_{zR_3} = \left(\frac{N_R - Z_R}{2p}t_{R_3} - n_R b_{пR}\right) l_R = \left(\frac{42-32}{2}\cdot 4{,}25 - 2\cdot 2{,}5\right)280 = 4550\ см^2;$$

на расстоянии $\frac{h_{пR} - h_{пв}}{2}$ от основания малого зубца

$$S''_{zR_4} = \frac{N_R - Z_R}{2p}t_{R_4} l_R = \frac{42-32}{2}\cdot 4{,}03\cdot 280 = 5650\ см^2;$$



у основания малого зубца

$$S''_{zR_5} = \frac{N_R - Z_R}{2p}t_{R_5} l_R = \frac{42-32}{2}\cdot 3{,}8\cdot 280 = 5320\ см^2.$$

9. Полная расчетная площадь сечений зубцов ротора:

$$S_{zR_1} = S'_{zR_1} + S''_{zR_1} = 8450 + 7060 = 15\,510\ см^2;$$

$$S_{zR_2} = S'_{zR_2} + S''_{zR_2} = 6300 + 5800 = 12\,100\ см^2;$$

$$S_{zR_3} = S'_{zR_3} + S''_{zR_3} = 4160 + 4550 = 8\,710\ см^2;$$

$$S_{zR_4} = S'_{zR_4} + S''_{zR_4} = 3640 + 5650 = 9\,290\ см^2;$$

$$S_{zR_5} = S'_{zR_5} + S''_{zR_5} = 3100 + 5320 = 8\,420\ см^2.$$

10. Высота ярма ротора

$$h_j = \frac{D_R - (2h_{пR} + d_0)}{2} = \frac{80{,}9 - (2\cdot 15 + 10)}{2} = 20{,}4\ см.$$

11. Средняя длина магнитных силовых линий в роторе:
в зубцах

$$L'_{zR} = 2h_{пв} = 2\cdot 12 = 24\ см,$$

$$L''_{zR} = 2(h_{пR} - h_{пв}) = 6\ см;$$

в ярме

$$L_{j_2} = \frac{\pi(d_0 + h_{j_2})}{2p} = \frac{\pi(10 + 20{,}4)}{2} = 47{,}8\ см.$$

## XI. Характеристика намагничивания

Расчет характеристики намагничивания на пару полюсов сведен в табл. 91.

## XII. Ток возбуждения при номинальной нагрузке

1. Реактивность реакции якоря

$$x_{ad} = \frac{\mu_0 F_{1N}}{B_\delta \delta'} = \frac{0{,}4\pi\cdot 10^{-8}\cdot 45\,000}{0{,}78\cdot 10^{-4}\cdot 3{,}63} = 2.$$

2. Проводимость потоков рассеяния обмотки статора:
в пазовой части

$$\lambda_п = \frac{3y+1}{4}\left(\frac{h_0}{b_0} + \frac{h_1}{3b_п}\right) = \frac{3\cdot 0{,}78 + 1}{4}\left(\frac{3{,}26}{2{,}3} + \frac{13{,}2}{3\cdot 2{,}3}\right) = 2{,}74,$$

где

$$h_0 = h_{кл} + \Delta_i + \Delta'_п = 2{,}5 + 0{,}56 + 0{,}2 = 3{,}26\ см\ (рис.\ 293);$$

$$h_1 = h_п - (h_{кл} + 2\Delta_i + \Delta'_п) = 17 - (2{,}5 + 2\cdot 0{,}56 + 0{,}2) = 13{,}2\ см;$$

в лобовой части

$$\lambda_л = k_л\frac{\tau}{l_i}q\frac{3y-1}{2} = 0{,}86\cdot\frac{137}{248}\cdot 9\cdot\frac{3\cdot 0{,}78 - 1}{2} = 2{,}85,$$

где $k_л = 0{,}86$, § 4-4;

в зазоре

$$\lambda_к = \frac{5\delta'}{5b_п + 4\delta'} = \frac{5\cdot 3{,}63}{5\cdot 2{,}3 + 4\cdot 3{,}63} = 0{,}7.$$

**Расчетные данные характеристики намагничивания**

| Наименование, формула | Единицы измерения | k=0,55 | k=1 | k=1,21 | k=1,33 |
|---|---|---|---|---|---|
| Э. д. с. статора $E = kU_{лN}$ | в | 6100 | 10 500 | 12 700 | 14 000 |
| Поток 1-й гармонической $\Phi$ | вб | 0,98 | 1,7 | 2,04 | 2,25 |
| 1-я гармоническая индукции в воздушном зазоре $B_{\delta_1} = \frac{\pi}{2}\frac{\Phi}{\tau l_i}$; $(B_{\delta_1} \approx B_\delta)$ | вб/м² | 0,43 | 0,78 | 0,936 | 1,03 |
| Идеальные индукции в различных сечениях зубцов статора: | | | | | |
| $B'_{z1} = B_{\delta_1}\frac{t_1 l_i}{b_{z1} l_{Fe}}$ | » | 1,0 | 1,73 | 2,08 | 2,3 |
| $B'_{z12} = B'_{z1}\frac{b_{z1}}{b_{z12}}$ | » | 0,74 | 1,27 | 1,54 | 1,69 |
| $B'_{z13} = B'_{z1}\frac{b_{z1}}{b_{z13}}$ | » | 0,59 | 1,02 | 1,23 | 1,36 |
| Зубцовые коэффициенты: | | | | | |
| $k_{z1} = \frac{b_п l_i}{b_{z1} l_{Fe}} = 1,02$ | — | — | — | — | |
| $k_{z2} = k_{z1}\frac{b_{z1}}{b_{z12}} = 0,746$ | — | — | — | — | |
| $k_{z3} = k_{z1}\frac{b_{z1}}{b_{z13}} = 0,588$ | — | — | — | — | |
| Удельные м. д. с. в различных сечениях зубцов статора (сталь Э41): | | | | | |
| $aw_{z1}$ | а/см | 4,14 | 160 | 630 | 1160 |
| $aw_{z2}$ | » | 2,14 | 9,4 | 47,6 | 122 |
| $aw_{z3}$ | » | 1,44 | 4,35 | 8,1 | 14,9 |
| Расчетное значение удельных м. д. с. в зубцах статора $aw_z = \frac{aw_{z1} + 4aw_{z2} + aw_{z3}}{6}$ | » | 2,36 | 33,7 | 138 | 277 |
| Индукция в ярме статора $B_j = \frac{\Phi_1}{2 l_{Fe} h_j}$ | вб/м² | 0,82 | 1,41 | 1,71 | 1,88 |
| Удельная м. д. с. в ярме статора $aw_j$ | а/см | 1,63 | 8,4 | 35 | 68 |
| М. д. с. на воздушный зазор $2F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta'$ | а | 24 800 | 45 000 | 54 000 | 59 500 |
| М. д. с. на зубцы статора $2F_{z1} = L_{z1} aw_z$ | » | 80 | 1 140 | 4 700 | 9 400 |





| Наименование, формула | Единицы измерения | k=0,55 | k=1 | k=1,21 | k=1,33 |
|---|---|---|---|---|---|
| М. д. с. на ярмо статора $2F_j = L_j aw_j$ | а/см | 385 | 1 980 | 8 250 | 16 100 |
| Идеальные индукции в сечениях зубцов ротора: | вб/м² | | | | |
| $B'_{zR_1} = \frac{\Phi_1}{S_{zR_1}}$ | » | 0,63 | 1,09 | 1,31 | 1,45 |
| $B'_{zR_2} = \frac{\Phi_1}{S_{zR_2}}$ | » | 0,81 | 1,4 | 1,68 | 1,87 |
| $B'_{zR_3} = \frac{\Phi_1}{S_{zR_3}}$ | » | 1,12 | 1,94 | 2,24 | 2,59 |
| $B'_{zR_4} = \frac{\Phi_1}{S_{zR_4}}$ | » | 1,05 | 1,82 | 2,2 | 2,44 |
| $B'_{zR_5} = \frac{\Phi_1}{S_{zR_5}}$ | » | 1,16 | 2,0 | 2,42 | 2,68 |
| Зубцовые коэффициенты (стр. 732): $k_{zR_1} = 0,47$; $k_{zR_2} = 0,62$; $k_{zR_3} = 0,84$; $k_{zR_4} = 0,64$; $k_{zR_5} = 0,71$. | | | | | |
| Удельные м. д. с. в различных сечениях зубцов ротора: | | | | | |
| $aw_{zR_1}$ | а/см | 4,18 | 11,8 | 22,4 | 34,8 |
| $aw_{zR_2}$ | » | 7,15 | 29,5 | 85,0 | 195,0 |
| $aw_{zR_3}$ | » | 12,8 | 250 | 1120 | 2660 |
| $aw_{zR_4}$ | » | 11,0 | 170 | 1070 | 2200 |
| $aw_{zR_5}$ | » | 14,4 | 330 | 2100 | 3400 |
| Расчетные удельные м. д. с. в зубцах ротора: | » | | | | |
| $aw'_{zR} = \frac{aw_{zR_1} + 4aw_{zR_2} + aw_{zR_3}}{6}$ | » | 7,6 | 63,7 | 248 | 580 |
| $aw''_{zR} = \frac{aw_{zR_3} + 4aw_{zR_4} + aw_{zR_5}}{6}$ | » | 12,7 | 210 | 1250 | 2470 |
| М. д. с. на отдельные участки зубцов ротора: | | | | | |
| $2F'_{zR} = aw'_{zR} L'_{zR}$ | а | 182 | 1530 | 5960 | 14 000 |
| $2F''_{zR} = aw''_{zR} L''_{zR}$ | » | 76 | 1260 | 7500 | 14 800 |
| Индукция в ярме ротора $B_{j2} = \frac{\Phi_1}{2 l R h_{j2}}$ | вб/м² | 0,86 | 1,48 | 1,79 | 1,97 |
| Удельная м. д. с. в ярме ротора $aw_{j2}$ | а/см | 7,9 | 38,3 | 144 | 360 |
| М. д. с. на ярмо ротора $2F_{j2} = aw_{j2} l_{j2}$ | а | 276 | 1825 | 6860 | 17 200 |

| Наименование, формула | Единицы измерения | $k=0{,}55$ | $k=1$ | $k=1{,}21$ | $k=1{,}33$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Суммарная м. д. с. холостого хода на пару полюсов $2F_0 = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{j2} + 2F'_{zR} + 2F''_{zR} + 2F_{j2}$ | *a* | 25 800 | 52 735 | 87 280 | 130 600 |
| Ток возбуждения в относительных единицах $i_f = \frac{i_f}{i_{f_0}}$ | | 0,49 | 1,0 | 1,67 | 2,5 |

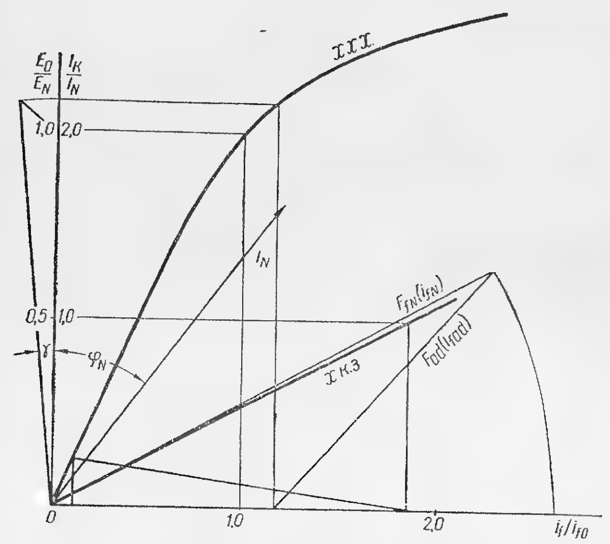



Рис. 294. Характеристики холостого хода, короткого замыкания и диаграмма Потье.

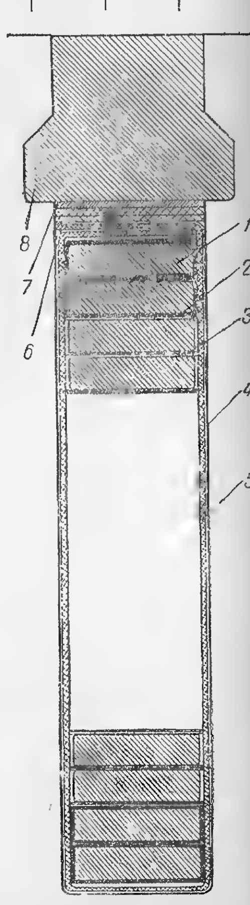



Рис. 295. Паз ротора.

3. Реактивность рассеяния статора

$$x_s = 2\pi\mu_0 \frac{F_{1N} l_i}{k_w^2 \Phi_N} \frac{2p}{Z_1}(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_к) + \left[\frac{5}{8}\left(\frac{2p}{Z}\right)^2 + \sigma_{В}\right] x_{ad} =$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-8} \frac{45000 \cdot 248}{0{,}9^2 \cdot 1{,}7} \frac{2}{54}(2{,}74 + 2{,}85 + 0{,}7) + $$

$$+ \frac{5}{8} \times \left(\frac{2}{54}\right)^2 \cdot 2 = 0{,}122 + 0{,}0017 = 0{,}124,$$

где $\sigma_{В}$ — по рис. 26; при $y = 0{,}78$ величиной $\sigma_{В}$ пренебрегаем.

4. Синхронная реактивность и о. к. з.

$$x_d = x_{ad} + x_s = 2 + 0{,}124 = 2{,}124;$$

$$о.\ к.\ з. = \frac{1}{x_d} = \frac{1}{2{,}124} = 0{,}47.$$



5. Строим диаграмму Потье (рис. 294) и определяем м. д. с. возбуждения при номинальном режиме

$$2F_{fN} = 2{,}64 \cdot 2F_0 = 2{,}64 \cdot 52\,735 = 139\,000\ a.$$

6. Предел статической устойчивости

$$M_{max} = \frac{U i_f x_{ad}}{x_d} = \frac{69\,500 \cdot 2}{45\,000 \cdot 2{,}124} = 1{,}46,$$

где

$$i_f = \frac{F_{fN}}{F_{1N}}.$$

XIII. Расчет обмотки возбуждения. Пазы ротора (§ 12-35)

1. Сечение меди в пазу ротора

$$Q_{Cuf} = \frac{2 \cdot 2F_{fN}}{s_f Z_R} = \frac{2 \cdot 139\,000}{400 \cdot 32} = 21{,}8\ см^2,$$

где $s_f = 400\ a/см^2$ — принимаем на основании опытных данных; при отсутствии опытных данных — по § 12-22.

2. Исходя из принятой ширины паза ротора выбираем по стандарту прямоугольную медь с размерами $5{,}5 \times 22$ *мм*, сечение проводника $q_f = 1{,}2\ см^2$.

3. Число проводников в пазу ротора

$$s_{пR} = \frac{Q_{Cuf}}{q_f} = \frac{21{,}8}{1{,}2} = 18{,}1.$$

Принимаем $s_{пR} = 18$.

4. Составляем спецификацию паза ротора (рис. 295):

| Наименование | Размеры по ширине паза (в *мм*) | Размеры по высоте паза (в *мм*) |
|---|---|---|
| *1*. Проводники, медь 5,5×22 *мм* . . . | 22 | 5,5 × 18=99 |
| *2*. Изоляция двух верхних и двух нижних витков: микалента толщиной 0,13 *мм*, один слой вполнахлеста (марка ЛФС-1) . . . . . . . . . . | 0,13 × 4 = 0,52 | 0,13×4×4=2,08 |
| *3*. Прокладки между проводниками: твердо прессованный миканит толщиной 0,25 *мм*, два слоя вперекрой | — | 0,25 × 2 × 14 = 7 |
| *4*. Обкладка паза стальная . . . . . . | 0,3 × 2 = 0,6 | 0,3 × 3 = 0,9 |
| *5*. Обкладка паза миканит твердый . . | 0,9 × 2 = 1,8 | 0,9 × 3 = 2,7 |
| *6*. Прокладки уплотнительные миканитовые . . . . . . . . . . . . . . | 0 | 1 × 2 = 2,0 |
| *7*. Стальная прокладка . . . . . . . . | — | 1,0 |
| *8*. Клин алюминиевый . . . . . . . . | — | 28 |
| *9*. Прокладки изолирующие: миканит толщиной Δ = 0,5 *мм* . . . . . . . | — | 0,5 × 2 = 1 |
| Размеры паза . . . . . . . . . . . . | $b_{пR} = 25$ *мм* | $h_{пR} = 144$ *мм* |

5. Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$w_f = s_{\text{п}R}\frac{Z_R}{4p} = 18 \cdot \frac{32}{4} = \mathbf{144}.$$

6. Ток возбуждения при номинальной нагрузке статора

$$i_{fN} = \frac{F_{fN}}{w_f} = \frac{69\,500}{144} = 482\ a.$$

7. Длина лобовой части обмотки ротора (приложение VI)

$$l_{\text{л}R} = 2c_2 + b_{\text{Cu}\,R}\frac{Z_R}{4p} + c_2'\left(\frac{Z_R}{4p} - 1\right) + \frac{K_\gamma D_{\text{ср}}}{p} - 0{,}86\left(R_{\text{Cu}R} + \frac{b_{\text{Cu}R}}{2}\right) =$$

$$= 2 \cdot 8 + 2{,}2 \cdot 8 + 2{,}0\,(8 - 1) + \frac{0{,}97 \cdot 62{,}9}{1} - 0{,}86\left(3 + \frac{2{,}2}{2}\right) = 105\ \text{см},$$

где $K_\gamma = (1 - 0{,}5\gamma)\,\frac{\pi}{2} = 0{,}97$.

8. Средняя длина витка обмотки ротора

$$l_{wf} = 2\,(l_R + l_{\text{л}R}) = 2\,(280 + 105) = \mathbf{770\ см}.$$

9. Сопротивление обмотки возбуждения при 15,75 и 120° С:

$$r_{f15} = \rho_{15}\frac{2pw_f l_{wf}}{q_f} = \frac{1{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 144 \cdot 770}{1{,}2} = 0{,}324\ \text{ом};$$

$$r_{f75} = 1{,}24 r_{f15} = 1{,}24 \cdot 0{,}324 = \mathbf{0{,}403\ ом};$$

$$r_{f120} = 1{,}42 r_{f15} = 1{,}42 \cdot 0{,}324 = 0{,}46\ \text{ом}.$$

10. Напряжение на кольцах ротора:

при холостом ходе и номинальном напряжении на зажимах статора

$$U_{f0} = r_{f15} i_{f0} + \Delta U = 0{,}324 \cdot 182 + 2 = 59 + 2 = 61\ в,$$

где

$$i_{f0} = \frac{F_{f0}}{w_f} = \frac{52\,435}{2 \cdot 144} = 182\ a;$$

$\Delta U = 2в$ — падение в щеточном контакте;

при номинальном режиме работы генератора (горячая машина)

$$U_{fN} = r_{f120} i_{fN} + \Delta U = 0{,}46 \cdot 482 + 2 = \mathbf{224\ в}.$$

11. Мощность возбуждения при номинальном режиме генератора

$$P_{fN} = U_{fN} i_{fN} = 224 \cdot 482 = 108 \cdot 10^3\ вт = 108\ квт.$$

Возбудитель возможно выбрать по каталогу (серия ВТ).

## XIV. Сегментировка пакета статора

При внешнем диаметре статора $D_j > 99$ *см* железо статора шихтуется из отдельных сегментов. Статор выполняется неразъемным.

1. Число пазов в сегменте (кратное 3) можно взять $n_z = 3$ и $n_z = 6$. При $n_z = 3$ получается более экономичный раскрой, но зато большее число вырубок штампа.

2. Длина хорд сегмента:

большая хорда

$$l_{c1} = D_j \sin\frac{360°}{2n_{\text{сег}}} = 180\ \frac{360°}{2 \cdot 18} = 31{,}15\ \text{см};$$

малая хорда

$$l_{c2} = D \sin\frac{360°}{2n_{\text{сег}}} = 15{,}2\ \text{см},\quad n_{\text{сег}} = \frac{Z_1}{n_z} = \frac{54}{3} = 18.$$



Длина хорд штампа сегмента должна быть меньше расчетной на 0,01 *см* по условиям технологии сборки железа статора. Каждый сегмент имеет 2 выреза для крепления сегментов по окружности статора.

3. Сегменты [см. эскиз сегмента (рис. 296) и раскрой листа (рис. 297)] штампуются из листов электротехнической стали размерами 86×172 *см* по 9 сегментов из листа.

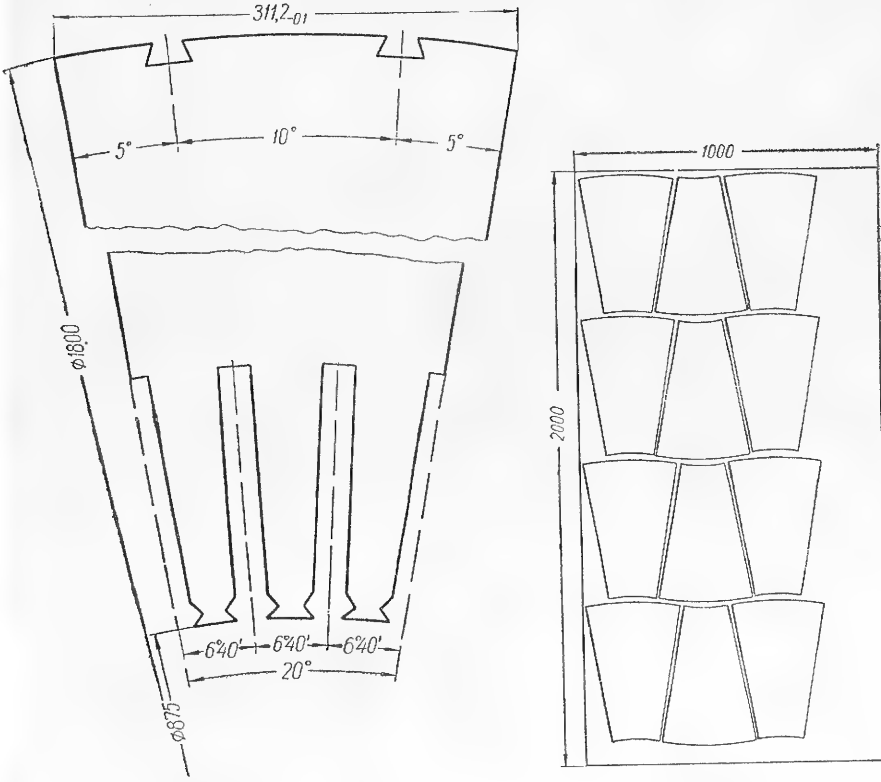



Рис. 296. Сегмент статора.

Рис. 297. Раскрой листа электротехнической стали.

Количество сегментов на весь статор при толщине листа $\Delta = 0{,}05$ *см*

$$\Sigma n_{\text{сег}} = \frac{l_{\text{Fe}}}{\Delta}\,n_{\text{сег}} = \frac{204}{0{,}05} \cdot 18 = 73\,440.$$

Необходимое число листов на весь статор составит 8160. Коэффициент использования листа $k_{\text{исп}} = 0{,}65$.

## XV. Вес активных материалов и характеристика их использования

1. Вес меди обмотки статора без изоляции

$$G_{\text{Cu}1} = m\gamma_{\text{Cu}} w_1 l_w q_{\text{ф}} = 3 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 958 \cdot 5{,}84 = 2680\ кг.$$

Вес меди обмотки статора с изоляцией ПДА

$$G'_{\text{Cu}_1} = 1{,}06\,G_{\text{Cu}_1} = 1{,}06 \cdot 2680 = \mathbf{2840\ кг}.$$

2. Вес изоляции обмотки статора

$$G_i = 2\gamma_i Z_i (h_c + b_c - 2\Delta_i)\,\Delta_i l_{w_1} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 54\,(7{,}06 + 2{,}23 - 0{,}97) \times \times 0{,}485 \cdot 958 = 834 \ кг,$$

где $Z_1 = 54$; $l_{w1} = 958$ *см*; $\Delta_i = 0{,}485$ *см*;
$h_c = 7{,}06$ *см* — высота изолированной секции;
$b_c = 2{,}23$ *см* — ширина изолированной секции.

3. Вес меди обмотки ротора без изоляции

$$G_{Cuf} = 2p\gamma_{Cu} w_f l_{wf} q_f = 2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 144 \cdot 770 \cdot 1{,}2 = 2380 \ кг.$$

Вес меди обмотки ротора с изоляцией ПДА

$$G'_{Cuf} \approx 1{,}06 G_{Cuf} = 1{,}06 \cdot 2380 = 2520 \ кг.$$

4. Суммарный вес меди

$$G_{Cu} = G_{Cu1} + G_{Cuf} = 2680 + 2380 = 5060 \ кг.$$

5. Чистый вес железа ярма статора

$$G_{Fej} = \frac{\pi}{4}\left[D_j^2 - (D_j - 2h_j)^2\right] l_{Fe}\gamma_{Fe} =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left[180^2 - (180 - 2 \cdot 29{,}2)^2\right] 204 \cdot 7{,}85 \cdot 10^{-3} = 22\,100 \ кг.$$

6. Чистый вес железа зубцов статора

$$G_{Fez} = Z_1 b_{z12} h_п l_{Fe}\gamma_{Fe} = 54 \cdot 3{,}78 \cdot 17 \cdot 204 \cdot 7{,}85 \cdot 10^{-3} = 5550 \ кг;$$

$$G_{Fe} = G_{Fej} + G_{Fez} = 27\,650 \ кг.$$

7. Заготовительный вес железа статора

$$G'_{Fe} = 5{,}8 \cdot 8160 = 47400 \ кг,$$

где 5,8 *кг* — вес листа;
8160 — количество листов.
Часть отходов используется (см. рис. 297).

8. Удельный расход (на 1 *ква*) чистых материалов:
меди

$$g_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P_N} = \frac{5060}{37\,500} = 0{,}135 \ кг/ква;$$

стали статора

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P_N} = \frac{27\,650}{37\,500} = 0{,}74 \ кг/ква.$$

9. Расход активной стали на 1 *ква* с учетом отходов на штамповку

$$q'_{Fe} = \frac{G'_{Fe}}{P_N} = \frac{47\,400}{37\,500} = 1{,}26 \ кг/ква.$$

## XVI. Расчет потерь и к. п. д. (§ 12-36)

1. Основные потери в меди статора

$$p_{Cu1} = 3I_N^2 r_{75} = 3 \cdot 2060^2 \cdot 0{,}0064 = 81{,}5 \cdot 10^3 \ вт = \mathbf{81{,}5 \ квт}.$$

2. Коэффициент сопротивления (§ 5-3)

$$k_r = 1 + \frac{m^2 - 1}{9}\xi^4 = 1 + \frac{42^2 - 1}{9} \cdot 0{,}161^4 = 1{,}149,$$



где $m = 21 \cdot 2 = 42$ — число рядов по высоте;

$$\xi \approx \sqrt{\frac{b_{Cu}}{b_п}\frac{\mu_0\omega}{2\rho}}\,h = \sqrt{\frac{1{,}18 \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 314}{2{,}3 \cdot 2 \cdot 2{,}17 \cdot 10^{-6}}} \cdot 0{,}244 = 0{,}161;$$

$h = 0{,}244$ — высота проводника, *см*;
$b_{Cu} = 1{,}18$ — ширина меди паза, *см*.

3. Основные потери в зубцах статора

$$p_z = k_z p_{10} B_{z12}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_z = 1{,}4 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}27^2 \cdot 5550 = 20 \cdot 10^3 \ вт = 20 \ квт,$$

где $k_z = 1{,}4$; $B_{z12} = 1{,}27$ *вб/м²* и $p_{10} = 1{,}6$ *вт/кг* — удельные потери для стали Э41 при толщине листа 0,5 *мм* — по приложению II, табл. 1.

4. Основные потери в ярме статора

$$p_j = k_j p_{10}\left[B_j \frac{вб}{м^2}\right]^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_j = 1{,}4 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}41^2 \cdot 22100 =$$

$$= 98 \cdot 10^3 \ вт = 98 \ квт,$$

где $k_j = 1{,}6$.

5. Суммарные потери в железе статора

$$p_{Fe} = p_{Fez} + p_{Fej} = 20 + 98 = 118 \ квт.$$

6. Добавочные потери на холостом ходу (§ 5-2):
на поверхности ротора от зубцовых гармонических статора

$$p_{0R} = 0{,}5k'_0 (B_0 t_1)^2 k_{\nu r}^2 \left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5} f_1^{1,5} S_R =$$

$$= 0{,}5 \cdot 10800\,(0{,}78 \cdot 10^{-5} \cdot 5{,}09)^2 \cdot 0{,}8\,(54 \cdot 50)^{1,5} \cdot 47400 = = 45 \cdot 10^3 \ вт = 45 \ квт,$$

где $k'_0 = 10\,800$ — по табл. 6 (без учета рифления);
$B_0 = (k_C - 1)\,B_\delta = (1{,}1 - 1)\,0{,}78 \cdot 10^{-4} = 0{,}78 \cdot 10^{-5}$ *вб/см²*;
$S_R = l_R\left[\pi D_R - (Z_R + n_в)\,b_{пR}\right] = 280\,[\pi 80{,}9 - (32 + 4)\,2{,}5] = 47\,400$ *см²*;
$k_{\nu r}^2 \cong 0{,}8$ — по рис. 32;
$n_в$ — число каналов в большом зубе.

Суммарные пульсационные потери в зубцах статора:

$$p_{п0} = 27{,}5 \cdot 10^6 \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 \left(\frac{N_R}{p}\right)^2 (B_{п0}^2 + B_{zs0}^2)\,G_{z1} = 27{,}5 \cdot 10^6 \cdot 42^2\left[(0{,}467 \cdot 10^{-6})^2 + + (0{,}205 \cdot 10^{-5})^2\right] \cdot 5550 = 12 \cdot 10^3 \ вт = 12{,}3 \ квт,$$

где

$$B_{п0} = B_0 \frac{k_{C2} - 1}{k_C - 1} = 0{,}78 \cdot 10^{-5}\frac{1{,}06 - 1}{1{,}1 - 1} = 0{,}467 \cdot 10^{-5} \ вб/см^2;$$

$$B_{zs0} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 s_{пR} i_{f0} k_{\nu 2}}{2\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 18 \cdot 182}{2 \cdot 3{,}3}\,0{,}22 = 0{,}205 \cdot 10^{-5}\,\frac{вб}{см^2}\,^*;$$

$$k_{\nu 2} = \frac{2\pi\dfrac{\delta}{t_{1R}}}{\operatorname{sh} 2\pi\dfrac{\delta}{t_{1R}}} = \frac{2\pi\dfrac{3{,}3}{6{,}05}}{\operatorname{sh} 2\pi\dfrac{3{,}3}{6{,}05}} = 0{,}22.$$

* Для вычисления потерь при нагрузке следует вместо $i_{f0}$ подставить $i_{fN}$.

7. Добавочные потери от тока нагрузки (§ 5-2):
на поверхности статора от зубцовых полей ротора

$$p_{zs} = 0{,}06 \cdot 10^{-10} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} \frac{A_R^2 t_{1R}^4}{\delta^2} \left(\frac{N_R}{p}\right)^{1,5} k_\nu^2 S_s =$$

$$= 0{,}06 \cdot 10^{-10} \frac{1520^2 \cdot 6{,}05^4}{3{,}3^2} 42^{1,5} \cdot 0{,}22^2 \cdot 30\,600 = 0{,}67 \cdot 10^3 \text{ вт} = 0{,}67 \text{ квт},$$

где

$$A_R = \frac{s_{\text{п}R} i_{fN}}{t_{1R}} = \frac{19 \cdot 482}{6{,}05} = 1520 \text{ а/см};$$

$$S_s = \pi D l \frac{b_{z1}}{t_1};$$

на поверхности статора от высших гармонических м. д. с. ротора при $k_э = 1$ (рис. 33)

$$p_{\nu s} = 1{,}4 \cdot 0{,}6\gamma^2 \cdot 10^{-10} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} \frac{A_R \tau^4}{\delta^2} \varphi(\gamma) S_s =$$

$$= 1{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}762^2 \cdot 10^{-10} \frac{1520^2 \cdot 137^4}{3{,}3^2 \cdot 1{,}1^2} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 30\,600 = 36 \cdot 10^3 \text{ вт} = 36 \text{ квт},$$

где $\varphi(\gamma) = 4 \cdot 10^{-4}$ — по кривым рис. 34;

на поверхности ротора от зубцовых полей статора, вызываемых токами нагрузки,

$$p_{zR} = 1{,}4 \cdot 1{,}13 \cdot 10^{-8} \frac{A^2 t_1^4 k_{w1}^2 k_{\nu 1} \left(\frac{Z_1}{p}\right)^{1,5}}{\delta^2 \sqrt{\mu' \rho'}} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} S_R =$$

$$= 1{,}4 \cdot 1{,}13 \cdot 10^{-8} \frac{814^2 \cdot 5{,}09^4 \cdot 0{,}9^2 \cdot 0{,}135^2 \cdot 54^{1,5}}{3{,}3^2 \cdot 100} \cdot 47\,400 =$$

$$= 1{,}76 \cdot 10^3 \text{ вт } (1{,}76 \text{ квт}),$$

где

$$\sqrt{\mu' \rho'} = 100;$$

$$k_{\nu 1} = \frac{\pi \delta Z_1}{p\tau \operatorname{sh} \frac{\pi \delta Z_1}{p\tau}} = 0{,}135;$$

на поверхности ротора от высших гармонических м. д. с. статора

$$p_{\nu R} = 1{,}4 \cdot 4{,}5 \cdot 10^{-8} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,5} \frac{A^2 \tau^4}{\delta^2 \sqrt{\mu' \rho'}} \varphi(y) S_R =$$

$$= 1{,}4 \cdot 4{,}5 \cdot 10^{-8} \frac{814^2 \cdot 137^4}{3{,}3^2 \cdot 100} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}36 \cdot 47\,400 = 23{,}2 \cdot 10^3 \text{ вт} = 23{,}2 \text{ квт},$$

где $\varphi(y) = 0{,}36 \cdot 10^{-4}$ — по рис. 34 для $y = 0{,}78$;

в нажимных плитах (немагнитный материал плит)

$$p_{\text{пл}} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{\tau y}{4}\right)^{2/3}} \pi \left(D + \frac{\tau}{4}\right) F_{1N}^2 =$$

$$= \frac{2{,}8 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{137 \cdot 0{,}78}{4}\right)^{\frac{2}{3}}} \pi \left(87{,}5 + \frac{137}{4}\right) (45\,000)^2 = 2{,}41 \cdot 10^3 \text{ вт} = 2{,}41 \text{ квт};$$

в обмотке статора

$$p_{\text{Cu доб}} = p_{\text{Cu}1} (k_r - 1) = 81{,}5 (1{,}149 - 1) = 12{,}1 \text{ квт}.$$



8. Суммарные добавочные потери

$$p_{\text{доб}} = p_{0R} + p_{\text{п}0} + p_{zs} + p_{\nu s} + p_{zR} + p_{\nu R} + p_{\text{пл}} + p_{\text{Cu доб}} =$$

$$= 45 + 12{,}3 + 0{,}67 + 36{,}0 + 1{,}76 + 23{,}2 + 2{,}41 + 12{,}1 = 133{,}4 \text{ квт}$$

(в начале расчета предположено 120 *квт*).

9. Потери на возбуждение

$$p_f = \frac{P_{fN}}{\eta_f} = \frac{108}{0{,}9} = 120 \text{ квт},$$

где $\eta_f = 0{,}9$ — к. п. д. возбудителя.

10. Потери на трение (§ 5-4) в подшипниках (подшипники скольжения, вал горизонтальный)

$$p_{\text{т}} = 2{,}3 l_{\text{ц}} \frac{50}{\theta^0} \sqrt{\lambda_{50} p_{\text{ц}} d_{\text{ц}} \left(1 + 4 \frac{d_{\text{ц}}}{l_{\text{ц}}}\right)} v_{\text{ц}}^{1,5} =$$

$$= 2{,}3 \cdot 40 \frac{50}{60} \sqrt{0{,}002 \cdot 7{,}5 \cdot 28 \left(1 + 4 \cdot \frac{28}{40}\right)} \cdot 44^{1,5} = 28 \cdot 10^3 \text{ вт} = 28 \text{ квт},$$

где $l_{\text{ц}} = 40$ *см* — длина цапфы;

$d_{\text{ц}} = 28$ *см* — диаметр цапфы

(эти величины уточняются после механического расчета);

$\theta = 60°$ — допустимая температура нагрева масла в подшипниках;

$\lambda_{50} = 0{,}002 \frac{\text{сек кг}}{\text{м}^2}$ вязкость масла при температуре 50°;

$$p_{\text{ц}} = \frac{G_R}{2 l_{\text{ц}} d_{\text{ц}}} = 7{,}5 \ \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}; \quad v_{\text{ц}} = \pi d_{\text{ц}} n \cdot 10^{-2} = \pi \cdot 28 \cdot \frac{3000}{50} \cdot 10^{-2} =$$

$$= 44 \frac{\text{м}}{\text{сек}}; \ G_R = 16\,700 \text{ кг — по эскизу ротора.}$$

11. Потери на вентиляцию:

потери на перемещение водорода вентиляторами машины

$$p_{v1} = 1{,}1 \frac{\gamma_{\text{н}}}{\gamma_{\text{возд}}} V (v_2^2 - v_1^2) = 0{,}11 \cdot 21 \cdot (127^2 - 72{,}5^2) = 25 \cdot 10^3 \text{ вт} = 25 \text{ квт}.$$

При $p_{\text{н}} = p_{\text{н}0} = 1{,}05$ $\gamma_{\text{н}}/\gamma_{\text{возд}} = 0{,}1$; $V$ — расход воздуха или водорода, *м³/сек*;

$$V = \frac{\Sigma p'}{1{,}1 \Delta\theta_{a(H)}} = \frac{460}{1{,}1 \cdot 20} \approx 21 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}};$$

$$\Sigma p' \approx P_{2N} \frac{1 - \eta}{\eta} 0{,}75 \approx 460 \text{ квт};$$

$\Delta\theta_{a(H)} = 20°$ — задаваемый перегрев водорода в машине;

$$v_2 = \pi D_R n \cdot 10^{-2} = \pi \cdot 80{,}9 \cdot 50 \cdot 10^{-2} = 127 \frac{\text{м}}{\text{сек}};$$

$$v_1 = \pi D_{R2} n \cdot 10^{-2} = \pi \cdot 46 \cdot 50 \cdot 10^{-2} = 72{,}5 \frac{\text{м}}{\text{сек}};$$

$D_{R2} = 46$ *см* — внутренний диаметр лопаток вентилятора (по эскизу ротора).

При известном к. п. д. вентилятора ($\eta_{\text{в}} \approx 0{,}25 \div 0{,}5$) и полезном напоре $H$ *кг/м²*

$$p_{v1} = \frac{9{,}81 HV}{\eta_{\text{в}}} \text{ вт}.$$

Потери на трение ротора о водород

$$pv_2 = 57{,}3 \frac{\gamma_н}{\gamma_{возд}} D_R^4 l'_R = 5{,}73 \cdot 0{,}809^4 \cdot 4{,}42 = 10{,}8 \text{ квт},$$

где $\gamma_н/\gamma_{возд} = 0{,}1$;

$l'_R = 4{,}42$ *м* — длина ротора с бандажами.

При повышенном давлении водорода потери на вентиляцию увеличиваются пропорционально отношению давлений $\left(\frac{p_н}{p_{н0}}\right)$.

12. Суммарные потери генератора

$$\Sigma p = p_{Cu1} + p_{Fe} + p_f + p_{доб} + p_т + pv =$$
$$= 81{,}5 + 118 + 120 + 133{,}4 + 28 + 35{,}8 \approx 517 \text{ квт}.$$

13. Коэффициент полезного действия

$$\eta_N = 1 - \frac{\Sigma p}{P_{2N} + \Sigma p} = 1 - \frac{517}{30\,000 + 517} = 0{,}9831$$

или $\eta_N = 98{,}31\%$.

## XVII. Расчет параметров (§ 12-24, 12-37)

1. Активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах

$$r_1 = k_r r_{1(75)} \frac{\sqrt{3} I_{1N}}{U_{лN}} = 1{,}149 \cdot 0{,}0064 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 2060}{10\,500} = 0{,}0026.$$

2. Реактивность рассеяния статора

$$x_s = 0{,}124.$$

3. Реактивность реакции якоря и синхронная реактивность

$$x_{ad} = 2{,}0; \quad x_d = 2{,}124.$$

4. Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к обмотке статора,

$$r_f = r_{f\,(75)} \frac{i_{f\delta}^2 x_{ad}^2}{P_N} = 0{,}403 \frac{162^2 \cdot 2^2}{37\,500 \cdot 10^3} = 0{,}00113,$$

где $i_{f\delta} = i_{fN}\left(\frac{F_\delta}{F_{fN}}\right)$ — по характеристике холостого хода.

5. Реактивность рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{fs} = \frac{2\pi\mu_0 F_N l_i}{\Phi_N} \frac{2p}{Z_R} \lambda_{fs} = \frac{2\pi \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 45\,000 \cdot 248}{1{,}7} \frac{2}{32} \cdot 4{,}67 = 0{,}153,$$

где

$$\lambda_{fs} = \lambda_{пR} + \lambda_{лR} + \lambda_{\delta R} = 2{,}72 + 1{,}48 + 0{,}47 = 4{,}67;$$

$$\lambda_{пR} = \frac{h_{1R}}{3b_{пR}} + \frac{h_{кR}}{b_{пR}} = \frac{12}{3 \cdot 2{,}5} + \frac{2{,}8}{2{,}5} = 2{,}72;$$

$$\lambda_{лR} = \frac{0{,}16 Z_R D_R}{p^2 l_R} = \frac{0{,}16 \cdot 32 \cdot 80{,}9}{280} = 1{,}48;$$

$$\lambda_{\delta R} = 0{,}2 + \frac{\delta}{2t_{1R}} = 0{,}2 + \frac{3{,}3}{2 \cdot 6{,}05} = 0{,}47.$$

6. Полная реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = x_{ad} + x_{fs} = 2 + 0{,}153 = 2{,}153.$$



7. Реактивность демпферной системы массивного ротора

$$x_{kd} = 0{,}0485 k_x k_l \sqrt{\frac{A}{500} \frac{k_w}{0{,}95} \frac{50}{\tau} \frac{0{,}85 \cdot 10^{-4}}{B_{\delta N}}} \sqrt{\frac{\rho_{Fe}}{2 \cdot 10^{-5}} \frac{50}{f_1}} \sqrt{s} =$$

$$= 0{,}0485 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}354 \cdot \sqrt{\frac{814}{500} \frac{0{,}9}{0{,}95} \cdot \frac{50}{137} \frac{0{,}85}{0{,}78}} \sqrt{s} = 0{,}0288 \sqrt{s},$$

где $k_x \approx 0{,}85$; $k_l = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{l_i} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{137}{248} = 1{,}354$;

$\rho_{Fe} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ *ом см*.

8. Активное сопротивление демпферной системы

$$r_{kd} = x_{kd} \frac{k_r}{k_x} = 0{,}0288 \cdot \frac{1{,}3}{0{,}85} \sqrt{s} = 0{,}044 \sqrt{s},$$

где $k_r = 1{,}3$.

По [2]

$$x_{kd} \approx x_{kq} = \frac{2\pi\mu_0 F_{1N} l_i}{\Phi_N} \frac{2p}{Z_R} \left(\frac{\delta + 5}{t_{1R}}\right) =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 45000 \cdot 248}{1{,}7} \frac{2}{32} \cdot \left(\frac{3{,}3 + 5}{6{,}05}\right) = 0{,}0446.$$

9. Переходная реактивность

$$x'_d = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}}} = 0{,}124 + \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{0{,}153}} = 0{,}266.$$

10. Сверхпереходная реактивность

$$x''_d = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{kd}}} = 0{,}124 + \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{0{,}153} + \frac{1}{0{,}0288}} = 0{,}148.$$

11. Реактивность обратного следования фаз

$$x_2 \approx 1{,}22 x''_d = 1{,}22 \cdot 0{,}148 = 0{,}18.$$

12. Реактивность нулевого следования

$$x_0 = \frac{2\pi\mu_0 F_{1N} l_i}{k_w^2 \Phi_N} \frac{2p}{Z_1} (\lambda_{п0} + \lambda_{л0}) + \frac{4k_0 x_{ad}}{k_d k_w^2} \left(y - \frac{2}{3}\right) \left[\left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{27} + \frac{7}{18}\left(y - \frac{2}{3}\right) + \left(y - \frac{2}{3}\right)^2\right] =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} \cdot 45\,000 \cdot 248}{0{,}9^2 \cdot 1{,}7} \frac{2}{24} (1{,}39 + 0{,}38) + \frac{4 \cdot 0{,}5 \cdot 2}{1 \cdot 0{,}9^2} \left(0{,}78 - \frac{2}{3}\right) \left[\left(\frac{2}{54}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{27} + \frac{7}{18}\left(0{,}78 - \frac{2}{3}\right) + \left(0{,}78 - \frac{2}{3}\right)^2\right] = 0{,}043 + 0{,}051 = 0{,}094,$$

где

$$\lambda_{п0} = \frac{1}{b_п}\left[(3y - 2) h_0 + (9y - 5) \frac{h_1}{12} - (9y - 8) \frac{h_2}{12}\right] = \frac{1}{2{,}3}\left[(3 \cdot 0{,}78 - 2)\, 3{,}26 + \right.$$

$$\left. + (9 \cdot 0{,}78 - 5) \frac{13{,}2}{12} - (9 \cdot 0{,}78 - 8) \frac{1}{12}\right] = 1{,}39;$$

$$\lambda_{л0} \approx 0{,}2\lambda_л = 0{,}2 \cdot 1{,}9 = 0{,}38;$$

$$k_0 \approx 0{,}5; \quad k_d = 1.$$

## XVIII. Постоянные времени

1. Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора

$$T_0 = \frac{x_f}{\omega r_f} = \frac{2{,}153}{314 \cdot 0{,}00113} = 6{,}05 \text{ сек.}$$

2. Постоянная времени переходных токов в статоре и роторе (затухание периодической составляющей переходных токов):

при трехфазном коротком замыкании

$$T'_{d3} = T_0 \frac{x'_d}{x_d} = 6{,}05 \cdot \frac{0{,}266}{2{,}124} = 0{,}76 \text{ сек.};$$

при двухфазном коротком замыкании

$$T'_{d2} = T_0 \frac{x'_d + x_2}{x_d + x_2} = 6{,}05 \quad \frac{0{,}266 + 0{,}18}{2{,}124 + 0{,}18} = 1{,}17 \text{ сек.};$$

при однофазном коротком замыкании

$$T'_{d1} = T_0 \frac{x'_d + x_2 + x_0}{x_d + x_2 + x_0} = 6{,}05 \frac{0{,}266 + 0{,}18 + 0{,}094}{2{,}124 + 0{,}18 + 0{,}094} = 1{,}36 \text{ сек.}$$

3. Постоянные времени сверхпереходных токов (затухание периодической составляющей)

$$T''_d \approx T''_{d3} \approx T''_{d2} \approx T_{d1} = \frac{1}{8} T'_{d3} = \frac{0{,}76}{8} = 0{,}095 \text{ сек.}$$

Постоянные времени апериодической составляющей:

при трехфазном коротком замыкании

$$T_{a3} = \frac{x_2}{\omega r_1} = \frac{0{,}18}{314 \cdot 0{,}0026} = 0{,}217 \text{ сек.};$$

при однофазном коротком замыкании

$$T_{a1} = \frac{2x_2 + x_0}{3\omega r_1} = \frac{2 \cdot 0{,}18 + 0{,}094}{3 \cdot 314 \cdot 0{,}0026} = 0{,}182 \text{ сек.}$$

## XIX. Токи короткого замыкания (замыкание на зажимах при номинальном напряжении холостого хода)

1. Трехфазное короткое замыкание:

установившийся ток

$$I_d = \frac{1}{x_d} = \frac{1}{2{,}124} = 0{,}47;$$

переходный ток

$$I'_d = \frac{1}{x'_d} = \frac{1}{0{,}266} = 3{,}76;$$

сверхпереходной ток

$$I''_d = \frac{1}{x''_d} = \frac{1}{0{,}148} = 6{,}75.$$

2. Двухфазное короткое замыкание:

установившийся ток

$$I_{d2} = \frac{\sqrt{3}}{x_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{2{,}124 + 0{,}18} = 0{,}753;$$

переходной ток

$$I'_{d2} = \frac{\sqrt{3}}{x'_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{0{,}266 + 0{,}18} = 3{,}88;$$

сверхпереходной ток

$$I''_{d2} = \frac{\sqrt{3}}{x''_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{0{,}148 + 0{,}18} = 5{,}28.$$



3. Однофазное короткое замыкание:

установившийся ток

$$I_{d1} = \frac{3}{x_d + x_2 + x_0} = \frac{3}{2{,}124 + 0{,}18 + 0{,}094} = 1{,}25;$$

переходной ток

$$I'_{d1} = \frac{3}{x'_d + x_2 + x_0} = \frac{3}{0{,}266 + 0{,}18 + 0{,}094} = 5{,}55;$$

сверхпереходной ток

$$I''_{d1} = \frac{3}{x''_d + x_2 + x_0} = \frac{3}{0{,}148 + 0{,}18 + 0{,}094} = 7{,}1.$$

4. Кратность пика ударного тока трехфазного короткого замыкания

$$I_{\max} \approx 1{,}8 \frac{1}{x''_d} = 1{,}8 \frac{1}{0{,}148} = 12{,}2$$

или

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot 2060 \cdot 12{,}2 = 30\,000 \text{ } a.$$

## XX. Тепловой расчет

*Перегрев обмотки ротора* (§ 12-38).

1. Тепловой поток через изоляцию паза

$$w_i = \frac{2p_{fN}}{Z_R l_{wR} \Pi_R} = \frac{2 \cdot 108 \cdot 10^3}{32 \cdot 770 \cdot 33{,}8} = 0{,}26 \frac{вт}{см^2},$$

где

$$\Pi_R = 2(h_{пR} + b_{пR}) = 2(14{,}4 + 2{,}5) = 33{,}8 \text{ см.}$$

2. Перепад температуры по толщине изоляции паза

$$\theta_{iR} = \frac{w_i \Delta_{iR}}{k_i} = \frac{0{,}26 \cdot 0{,}1}{0{,}002} = 13°,$$

где $k_i = 0{,}002$ *вт/см°C* — теплопроводность гильзы из миканита;

$\Delta_i = 0{,}1$ *см* — односторонняя толщина изоляции.

3. Тепловой поток с единицы поверхности ротора от потерь в роторе

$$w_{\alpha R} = \frac{P_{fN} \frac{2l_R}{l_{wf}} + p_{v2} + p_{vR} + p_{zR} + p_{0R}}{\pi k_R D_R l_R} =$$

$$= \frac{108 \cdot 10^3 \frac{2 \cdot 280}{770} + (10{,}8 + 15 + 1{,}76 + 45)\,10^3}{\pi \cdot 1{,}8 \cdot 80{,}9 \cdot 280} = 1{,}2 \text{ } вт/см^2.$$

4. Перегрев поверхности ротора над охлаждающим газом

$$\theta_{\alpha R} = \frac{w_{\alpha R}}{\alpha_R} = \frac{1{,}2}{0{,}0465} = 25{,}8°,$$

где

$$\alpha_R = 1{,}3\alpha \left(\frac{p_н}{p_{н.о}}\right)^{0,8} = 1{,}3 \cdot 0{,}0358 = 0{,}0465 \text{ } вт/см^2 \, °C;$$

5. Перепад температуры по высоте зубца ротора

$$\theta_{zR} = 0{,}425 \frac{w_i}{k_{Fe}} \frac{h^2_{zR}}{b_{zR2}} = 0{,}425 \frac{0{,}26}{0{,}442} \frac{14{,}4^2}{2{,}42} = 21{,}2°,$$

где $k_{Fe} = 0{,}442$ *вт/см °C* — теплопроводность роторной поковки для стали марки ОХН1М.

6. Условный перегрев меди обмотки ротора пазовой части

$$\theta'_{\text{п}R} = \theta_{iR} + \theta_{\alpha R} + \theta_{zR} + 0{,}5\Delta\theta_a = 13 + 25{,}8 + 21{,}2 + 10 = 70^\circ\ C.$$

7. Тепловые сопротивления схемы замещения закрытого участка лобовой части обмотки ротора (рис. 278):

$$R_{i\text{б}} = \frac{\Delta_{i\text{б}}}{k_{i\text{б}}S_{i\text{б}}} = \frac{0{,}45}{0{,}0016 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}3 \cdot 105} = 4{,}05;$$

$$R_{\alpha\text{б}} = \frac{1}{\alpha_{\text{б}}S_{\alpha\text{б}}} = \frac{1}{1{,}3 \cdot 0{,}0358 \cdot 5 \cdot 0{,}3 \cdot 105} = 0{,}136;$$

$$R_{i\text{л}} = \frac{\Delta_{i\text{л}}}{k_{i\text{л}}S_{i\text{л}}} = \frac{0{,}04}{0{,}00176 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}3 \cdot 105} = 0{,}328;$$

$$R'_{\alpha\text{л}} = \frac{1}{\alpha_{\text{л}}S_{i\text{л}}} = \frac{1}{0{,}0094 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}3 \cdot 105} = 1{,}54,$$

где

$$S_{i\text{б}} = S_{i\text{л}} = b_{\text{Cu}R}l'_{\text{л}}; \quad S_{\alpha\text{б}} \approx l_{\alpha\text{б}}l'_{\text{л}},$$

$k_{i\text{л}} = k_{\lambda 1}k_i = 1{,}1 \cdot 0{,}0016 = 0{,}00176$ *вт/° C · см*;

$k_{\lambda 1} = 1{,}1$ — по кривым рис. 280;

$\alpha_{\text{л}} = 1{,}3 \cdot 0{,}00222\,(1 + 0{,}25v_s) = 1{,}3 \cdot 0{,}00222 \cdot (1 + 0{,}25 \cdot 10) = 0{,}0094$ *вт/ °C см²*;

$v_s = 10 \div 15$ *м/сек*, принимаем $v_s = 10$ *м/сек*;

$\alpha_{\text{б}} \approx \alpha_R = 1{,}3 \cdot 0{,}0358$ *вт/°C см²*;

$l'_{\text{л}} = 0{,}3l_{\text{л}R}$.

8. Проводимости эквивалентной схемы закрытого участка лобовой части обмотки ротора:

$$\Lambda_1 = \frac{1}{R_{i\text{б}} + R_{\alpha\text{б}}} = \frac{1}{4{,}05 + 0{,}136} = 0{,}24;$$

$$\Lambda_2 = \frac{1}{R_{i\text{л}} + R'_{\alpha\text{л}}} = \frac{1}{0{,}328 + 1{,}54} = 0{,}536;$$

$$\Lambda'_{\text{л}} = \Lambda_1 + \Lambda_2 = 0{,}24 + 0{,}536 = 0{,}776.$$

9. Тепловое сопротивление схемы замещения открытого участка лобовой части обмотки ротора (рис. 279)

$$R''_{\alpha\text{л}} = \frac{1}{\alpha_{\text{л}}S''_{\text{л}}} = \frac{1}{0{,}0094 \cdot 1900} = 0{,}056;$$

$$\Lambda''_{\alpha\text{л}} = \frac{1}{R''_{\alpha\text{л}}} = 17{,}8,$$

где

$S''_{\text{л}} = (2h_{\text{п}R} + b_{\text{п}R} - 2h_{\text{кл}})\,l''_{\text{л}} = (2 \cdot 14{,}4 + 2{,}5 - 2 \cdot 2{,}8) \cdot 0{,}7 \cdot 105 = 1900$ *см²*;

$l''_{\text{л}} = 0{,}7l_{\text{л}R}$.

10. Средний перегрев в лобовой части обмотки ротора

$$\theta_{\text{л. ср}} = \frac{p_{\text{л}}}{\Lambda'_{\text{л}} + \Lambda''_{\alpha\text{л}}} = \frac{2p_{fN}l_{\text{л}}}{Z_R l_{wf}}\,\frac{1}{\Lambda'_{\text{л}} + \Lambda''_{\alpha\text{л}}} = \frac{2 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 105}{32 \cdot 770}\,\frac{1}{18{,}6} = 51{,}5^\circ C.$$

11. Максимальный перегрев меди в лобовой части обмотки ротора

$$\theta_{\text{л}\max} \approx \theta_{\text{л. ср}} + \frac{p'_{ox}}{8k_{\text{Cu}}}\,l_x^2 = 51{,}5 + \frac{0{,}29}{8 \cdot 3{,}75} \cdot 31{,}5^2 = 51{,}5 + 9{,}6 = 61{,}1^\circ C,$$



где

$$p'_{ox} = \frac{s_f^2\rho}{1 + \Lambda'_{\text{л}}/\Lambda_{\text{Cu}}} = \frac{400^2 \cdot 2{,}36 \cdot 10^{-6}}{1 + \dfrac{0{,}776}{2{,}59}} = 0{,}29;$$

$\rho = 2{,}36 \cdot 10^{-6}$ *ом см* при $\theta = 100^\circ$ C;

$$\Lambda_{\text{Cu}} = \frac{k_{\text{Cu}}S_{\text{Cu}f}}{l_x} = \frac{3{,}75 \cdot 21{,}8}{31{,}5} = 2{,}59;$$

$S_{\text{Cu}f} = q_f s_{\text{п}R} = 21{,}8$ *см²*;

$k_{\text{Cu}} = 3{,}75$ *вт/° C · см*;

$l_x = l'_{\text{л}} \approx 0{,}3l_{\text{л}} = 0{,}3 \cdot 105 = 31{,}5$ *см*.

12. Средний перегрев обмотки ротора (гл. 6)

$$\theta_{\text{Cu}f} = \frac{\theta'_{\text{п}R}l_R + \theta_{\text{л. ср}}l_{\text{л}R}}{l_R + l_{\text{л}R}} = \frac{70 \cdot 280 + 51{,}5 \cdot 105}{280 + 105} = 65^\circ\ C,$$

т. е. ниже допустимого для изоляции класса В.

*Проверка статора на нагрев* (§ 12-16).

13. Тепловой поток от потерь в активной части статора, отнесенный к единице поверхности расточки статора,

$$w_a = \frac{p_{\text{Fe}}}{\pi Dl} + \frac{2p_{\text{Cu}}}{\pi Dl_w} = \frac{118 \cdot 10^3}{\pi \cdot 87{,}5 \cdot 276} + \frac{2 \cdot 81{,}5 \cdot 10^3}{\pi \cdot 87{,}5 \cdot 958} = 1{,}55 + 0{,}618 = 2{,}168\ \textit{вт/см}^2.$$

14. Удельная теплоотдача от железа статора и расточки статора (гл. 6)

$\alpha_{\text{Fe}} = (7 \div 9)\tau$; принимаем $\alpha_{\text{Fe}} = 7 \cdot 137 \cdot 10^{-4} = 0{,}096$ *вт/см² °С*.

Для водородного охлаждения

$$\alpha_{\text{Fe (H)}} = 1{,}3p^{0{,}8}\alpha_{\text{Fe}} = 1{,}3 \cdot 0{,}096 = 0{,}125\ \textit{вт/см}^2\ ^\circ\text{C}.$$

15. Перегрев железа статора над охлаждающим газом

$$\theta_{\text{Fe}} = \frac{w_a}{\alpha_{\text{Fe (H)}}} = \frac{2{,}168}{0{,}125} = 17{,}3\ ^\circ\text{C}.$$

16. Перепад температуры по толщине изоляции обмотки статора

$$\theta_i = \frac{2p_{\text{Cu}}}{\pi Dl_w}\,\frac{t_1\Delta_i}{\Pi_1 k_i} = 0{,}618\,\frac{5{,}09 \cdot 0{,}485}{38{,}6 \cdot 0{,}0015} = 26{,}4\ ^\circ\text{C},$$

где

$\Pi_i = 2\,(h_{\text{п}} + b_{\text{п}}) = 2\,(17 + 2{,}3) = 38{,}6$ *см*.

17. Перегрев меди статора над охлаждающим газом

$$\theta_{\text{Cu}s} = \theta_{\text{Fe}} + \theta_i + 0{,}5\,\Delta\theta_a = 17{,}3 + 26{,}4 + 0{,}5 \cdot 20 = 53{,}7\ ^\circ\text{C},$$

т. е. ниже допустимого перегрева обмотки с компаундированной изоляцией (65° C).

## XXI. Механический расчет ротора (гл. 8)

1. Минимальный диаметр вала (ротора) турбогенератора (выступающий конец)

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{kM_N}{0{,}2\tau_{\text{в}}}} = \sqrt[3]{\frac{1{,}7 \cdot 993 \cdot 10^3}{0{,}2 \cdot 600}} = 24\ \textit{см},$$

где $k = 1{,}7$ — кратность максимального момента турбогенератора;

$$M_N = 97\,500\,\frac{P_{2N}}{n\eta_N} = 97\,500\,\frac{30 \cdot 10^3}{3000 \cdot 0{,}982} = 993 \cdot 10^3\ \textit{кгсм}$$

— номинальный момент на валу;

$\tau_в$ — допустимое напряжение кручения для материала ротора. Учитывая наличие центрального отверстия в поковке ротора, принимаем

$$d_{min} = 27,5 \; см.$$

2. Напряжение в корне зубца ротора

$$\sigma_{z\,max} = \frac{F_z + F_{Cu}}{b_{zR13}} = \frac{955 + 1070}{1,38} = 1470 \; кг/см^2,$$

где

$$F_z = \frac{1}{981} g_z \omega^2 R_z = \frac{1}{981} \cdot 0,276 \cdot 314^2 \cdot 34,4 = 955 \; кг/см;$$

$$\omega = 2\pi n = 2\pi \cdot 50 = 314;$$

$$g_z = \frac{3,54 + 1,38}{2} \cdot 14,4 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 0,276 \; кг/см;$$

$R_z$ — радиус инерции зубца ротора;
$b_{zR13} = 1,38$ — по эскизу;

$$F_{Cu} = \frac{1}{981} g_{Cu} \omega^2 R_{Cu} = \frac{1}{981} \cdot 0,32 \cdot 314^2 \cdot 33,2 = 1070 \; кг/см;$$

$R_{Cu}$ — радиус инерции обмотки в пазу ротора;

$$g_{Cu} \approx b_{пR} h_{пR} \gamma_{Cu} = 2,5 \cdot 14,4 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,32 \; кг/см.$$

3. Напряжение клина паза ротора на смятие (ориентировочно)

$$\sigma_{к.\,см} = \frac{F_{Cu}}{2\frac{0,5}{\cos 45^\circ}} = 1070 \cdot 0,707 = 755 \; кг/см^2,$$

что допустимо.

4. Тангенциальное напряжение на поверхности центрального отверстия

$$\sigma_\tau = 2\sigma_r \frac{1}{1 - \alpha_0^2} + 0,825 \frac{\gamma_{Fe} v_a'^2}{981} (1 + 0,212\alpha_0^2) =$$

$$= 2 \cdot 520 \frac{1}{1 - 0,192^2} + 0,825 \frac{7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 8200^2}{981} (1 + 0,212 \cdot 0,192^2) = 1525 \; кг/см^2,$$

где

$$\sigma_r = \frac{(F_z + F_{Cu}) N_R}{\pi D_R'} = \frac{(955 + 1070)\,42}{\pi \cdot 52,1} = 520 \; кг/см^2$$

— среднее радиальное напряжение по дну пазов от веса зубцов и обмотки;
$D_R' = 52,1 \; см$ — диаметр ротора по дну пазов;

$$\alpha_0 = \frac{d_0}{D_R'} = \frac{10}{52,1} = 0,192;$$

$$\gamma_{Fe} = 7,85 \cdot 10^{-3} \; кг/см^3;$$

$$v_a' = \pi D_R' n = \pi 52,1 \cdot 50 = 82 \cdot 10^2 \; см/сек.$$

5. Напряжение в опасном сечении бандажа на разрыв

$$\sigma_б = \sigma_б' + \sigma_б'' = 1350 + 790 = 2140 \; кг/см^2,$$

где

$$\sigma_б' = 0,825 \frac{\gamma_{Fe}}{981} v_б^2 (1 + 0,212\alpha_0'^2) =$$

$$= 0,825 \frac{7,85 \cdot 10^{-3}}{981} \cdot 13\,200^2 (1 + 0,212 \cdot 0,9^2) = 1350 \; кг/см^2;$$

$$\alpha_0' = \frac{D_{б0}}{D_б} = \frac{74,8}{84} = 0,9;$$



$D_{б0} = 74,8 \; см$ — внутренний диаметр бандажа;
$D_б = 84 \; см$ — внешний диаметр бандажа;

$$v_б = \pi D_б n = \pi \cdot 84 \cdot 50 = 13\,200 \; см/сек;$$

$$\sigma_б'' = \frac{F_л}{2\pi Q_б} = \frac{1,13 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 228} = 790 \; кг/см^2;$$

$$F_л = \frac{G_{Cu\,л}}{981} \omega^2 R_{Cu\,л} = \frac{340}{981} \cdot 314^2 \cdot 33,2 = 1,13 \cdot 10^6 \; кг;$$

$G'_{Cu\,л} = G'_{Cu\,f} \frac{l_{лR}}{l_{wf}} = 2520 \cdot \frac{105}{770} = 340 \; кг$ — вес лобовой части обмотки ротора с изоляцией;

$$Q_б = 0,9 l_б \frac{D_б - D_{б0}}{2} = 0,9 \cdot 55,5 \frac{84 - 74,8}{2} = 228 \; см^2;$$

$l_б = 55,5 \; см$ — длина бандажа.

6. Прогиб ротора (рис. 298) в плоскости большого зуба по гл. 8

$$f = \frac{1}{2E}(G_R S_1 - S_2) = \frac{1}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^6}(16\,700 \cdot 26,4 - 89\,825) = 0,08 \; см,$$

где

$$S_1 = \frac{1}{3} \sum_i \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{I_i} = 26,4$$

и

$$S_2 = \frac{1}{4} \sum_i q_i \frac{x_i^4 - x_{i-1}^4}{I_i} = 89\,825 \text{ — по табл. 92.}$$

7. Первая критическая скорость вращения ротора

$$n_{кр1} = 300 \sqrt{\frac{1}{f}} = 300 \sqrt{\frac{1}{0,08}} = 1060 \text{ об/мин.}$$

8. Вторая критическая скорость вращения ротора

$$n_{кр2} = (3,2 \div 3,5)\, n_{кр1} = 3400 \div 3720 \text{ об/мин.}$$

Расчет прогибов и критических скоростей ротора по методу, изложенному в § 8-7.

Рассматриваем ротор как симметричный. Центр тяжести ротора совпадает с серединой бочки ротора.

9. Реакция левой опоры $A$ (рис. 299)

$$R_A = \frac{G_R}{l} x_{B1} = \frac{16\,700}{645} \cdot 317,5 = 8240 \; кг,$$

где $x_{A_1} = 327,5 \; см$ — расстояние от опоры $A$ до центра тяжести ротора; $x_B = 317,5 \; см$ — расстояние от опоры $B$ до центра тяжести ротора.

10. Изгибающий момент в сечениях ротора, соответствующих переходу от одного диаметра к другому

$$M_{xi} = R_A x_i - \sum_k Q_i x_{ki} \; кгсм,$$

где $x_i$ — расстояние от опоры $A$ до перехода от одного диаметра к другому;
$Q_i$ — вес участков ротора, имеющих различные диаметры, $кг$;
$x_{ki}$ — координата центра тяжести участка ротора, отсчитываемая от сечения, в котором определяется момент $M_{xi}$, к левой опоре.

11. Приведенные моменты диаграммы моментов

$$M'_{xi} = M_{xi} \frac{I_0}{I_{xi}} \quad и \quad M''_{xi} = M_{xi} \frac{I_0}{I_{x(i+1)}},$$

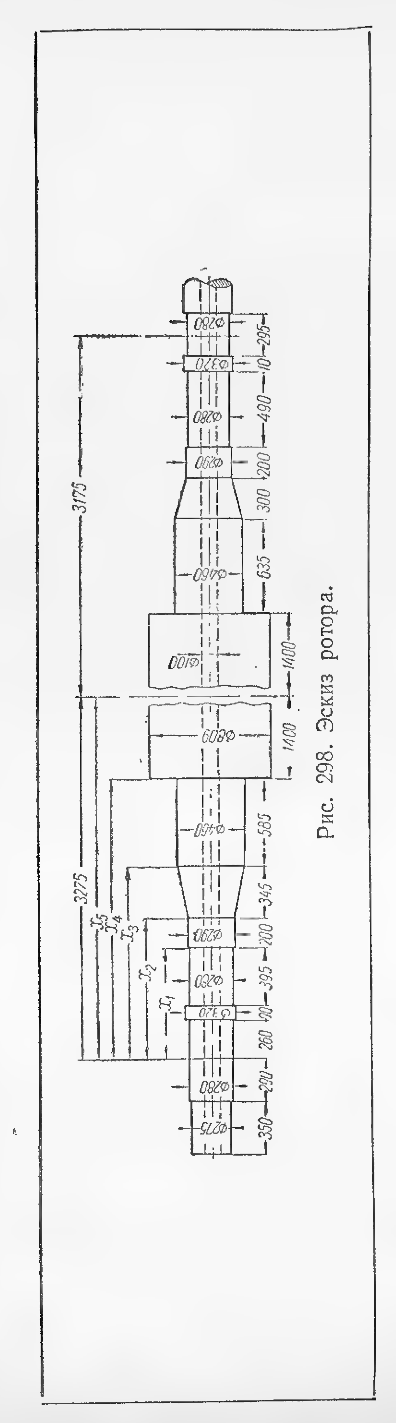



Рис. 298. Эскиз ротора.

*Таблица 92*

**Расчетные данные для определения прогиба**

| $d_i$ (в см) | $q_i$ (в кг/см) | $x_i$ (в см) | $x_i^3$ (в см³) | $x_i^3 - x_{i-1}^3$ (в см³) | $I_i$ (в см⁴) | $\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{I_i}$ (в см⁻¹) | $x_i^4$ (в см⁴) | $x_i^4 - x_{i-1}^4$ (в см⁴) | $\frac{x_i^4 - x_{i-1}^4}{I_i} q_i$ (в кг/см) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 28 | 4,15 | 74,5 | $4{,}14 \cdot 10^5$ | $4{,}14 \cdot 10^5$ | $2{,}97 \cdot 10^4$ | 13,9 | $30{,}8 \cdot 10^6$ | $0{,}308 \cdot 10^8$ | 4300 |
| 29 | 4,56 | 94,5 | $8{,}45 \cdot 10^5$ | $4{,}31 \cdot 10^5$ | $3{,}42 \cdot 10^4$ | 12,6 | $79{,}6 \cdot 10^6$ | $0{,}488 \cdot 10^8$ | 6500 |
| 37,5 | 8,0 | 129,0 | $21{,}5 \cdot 10^5$ | $13{,}05 \cdot 10^5$ | $9{,}5 \cdot 10^4$ | 13,7 | $278 \cdot 10^6$ | $1{,}985 \cdot 10^8$ | 16 700 |
| 46 | 12,4 | 187,5 | $65{,}7 \cdot 10^5$ | $44{,}2 \cdot 10^5$ | $21{,}93 \cdot 10^4$ | 20,1 | $1230 \cdot 10^6$ | $9{,}52 \cdot 10^8$ | 53 800 |
| 80,9 | 41,0 | 327,5 | $348 \cdot 10^5$ | $282{,}3 \cdot 10^5$ | $150 \cdot 10^4$* | 18,8 | $11\,400 \cdot 10^6$ | $101{,}7 \cdot 10^8$ | 278 000 |

* Момент инерции [illegible] с [illegible] наличия пазов по формуле стр. 837.



где $I_0$ — момент инерции сечения бочки ротора;

$I_{xi}$ — момент инерции $i$-го участка ротора;

$I_{x(i+1)}$ — момент инерции $i+1$ участка ротора.

Строим диаграмму приведенных моментов (рис. 299).

12. Определяем площади участков диаграммы моментов ротора, приближенно считая их трапециями

$$S_i = 0{,}5\,(x_i - x_{(i-1)})\,(M'_{xi} + M''_{x(i-1)})\ кгсм^2.$$

Суммарная площадь приведенной диаграммы моментов левой половины ротора

$$0{,}5S = \sum_{1}^{i} S_i = 29{,}51 \cdot 10^8\ кгсм^2.$$

13. Определяем координаты центров тяжести площадей приведенной диаграммы моментов от рассматриваемого сечения $x_{ci}$ и координаты центров тяжести площадей диаграммы от опоры $A$ $x'_{ci} = x_{A1} - x_{ci}$.

Результаты расчета по пунктам 9—13 сводим в табл. 93.

14. Статический прогиб ротора под центром тяжести

$$y_{A_1} = f_{A1} = \frac{1}{EI_0}(S_1x'_{c1} + S_2x'_{c2} + S_3x'_{c3} + S_4x'_{c4} + S_5x'_{c5}) = \frac{1 \cdot 10^8}{2{,}2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{12}}(11{,}3 \cdot 49{,}7 + 5{,}98 \times 84{,}9 + 4{,}86 \cdot 112{,}6 + 4{,}95 \cdot 159{,}9 + 2{,}42 \cdot 261{,}3) = 0{,}092\ см.$$

15. Первая критическая скорость вращения ротора

$$n_{кр1} = 315\sqrt{\frac{1}{f_{A1}}} = 315\sqrt{\frac{1}{0{,}092}} = 1040\ об/мин.$$

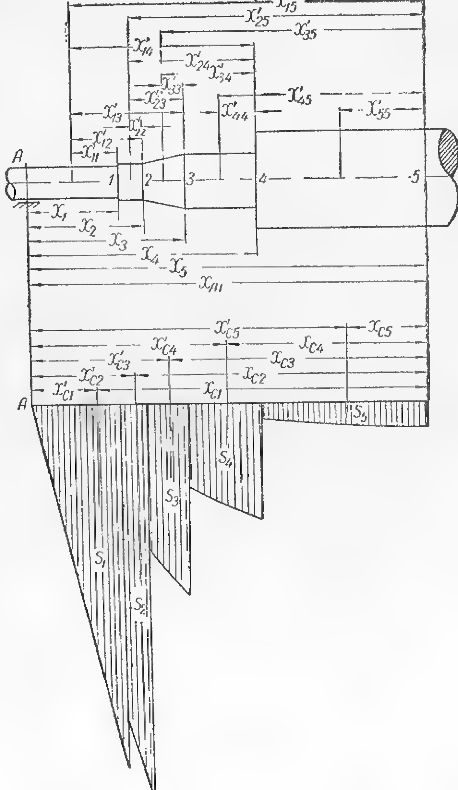



Рис. 299. Диаграмма приведенных моментов для расчета прогиба ротора и 1-й критической скорости.

*Таблица 93*

**Расчетные данные для определения прогиба**

| № сечений | $d_i$ (в см) | $x_i$ (в см) | $Q_i$ (в кг) | $I_{xi} \cdot 10^{-4}$ (в см⁴) | $M_{xi} \cdot 10^{-4}$ (в кгсм) | $M'_{xi} \cdot 10^{-6}$ (в кгсм) | $M''_{xi} \cdot 10^{-6}$ (в кгсм) | $S_i \cdot 10^{-8}$ (в кгсм²) | $x_{ci}$ (в см) | $x'_{ci}$ (в см) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 28,0 | 74,5 | 310,0 | 2,97 | 60,35 | 30,4 | 26,40 | 11,30 | 277,8 | 49,7 |
| 2 | 29,0 | 94,5 | 91,2 | 3,42 | 76,14 | 33,4 | 12,00 | 5,98 | 242,6 | 84,9 |
| 3 | 37,5 | 129,0 | 276,0 | 9,50 | 102,50 | 16,2 | 7,00 | 4,86 | 214,9 | 112,6 |
| 4 | 46,0 | 187,5 | 1505,0 | 21,93 | 144,70 | 9,9 | 1,45 | 4,95 | 167,6 | 159,9 |
| 5 | 80,9 | 327,5 | 5740,0 | 150,00 | 200,30 | 2,0 | 2,00 | 2,42 | 66,2 | 261,3 |

Для определения второй критической скорости ротора рассматриваем половину ротора от центра тяжести до одной из опор как вал переменного сечения, свободно лежащий на двух опорах (за новую опору принимаем центр тяжести ротора).

16. Координата центра тяжести левой половины ротора относительно опоры $A$ (рис. 300), ($x'_i$ — координата центра тяжести i-го участка)

$$x_{A_2} = \frac{2\sum Q_i x'_i}{G_R} = \frac{2 \cdot 1\,768\,000}{16\,700} = 212 \text{ см}.$$

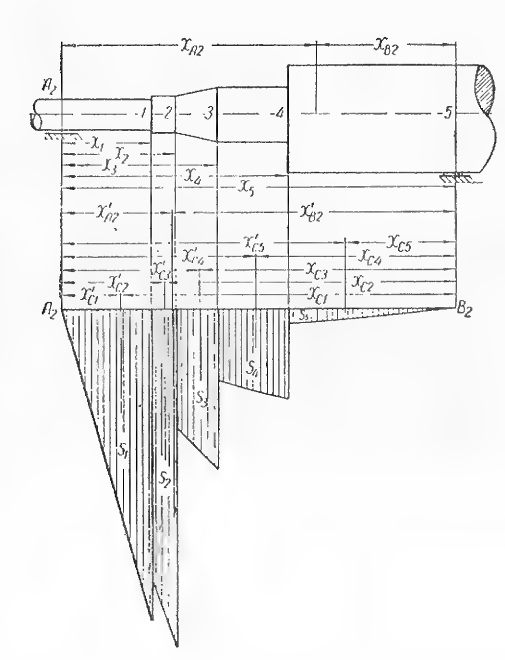


Рис. 300. Диаграмма приведенных моментов для расчета 2-й критической скорости.

17. Реакция опоры $A$ для расчета второй критической скорости

$$R_{A_2} = \frac{G_R}{2}\,\frac{x_{B_2}}{x_A} = \frac{16\,700}{2}\,\frac{115{,}5}{327{,}5} = 2950 \text{ кг},$$

где $x_{B_2} = x_A - x_{A_2} = 327{,}5 - 212 = 115{,}5$ *см*; $x_A = 327{,}5$ *см* — см. п. 9.

18. Изгибающие моменты в сечениях перехода от одного диаметра ротора к другому

$$M_{xi} = R_{A_2} x_i - \Sigma Q_i x'_i \text{ кг см}.$$

19. Приведенные моменты диаграммы моментов

$$M'_{xi} = M_{xi}\frac{I_0}{I_{xi}} \text{ и } M''_{xi} = M_{xi}\frac{I_0}{I_{x(i+1)}}.$$

20. Площади диаграммы моментов (рис. 300)

$$S_i = 0{,}5\,(x_i - x_{i-1})(M'_{xi} + M''_{x(i-1)});$$

$$S = \sum_1^i S_i = 9{,}48 \cdot 10^8 \text{ кг см}^2.$$

21. Определяем координаты центров тяжести площадей диаграммы моментов от опоры $A$

$$x'_{ci} = x_{(i-1)} + \frac{x_i - x_{i-1}}{3}\,\frac{M''_{x(i-1)} + 2M'_{xi}}{M''_{x(i-1)} + M'_{xi}}.$$

22. Координата центра тяжести диаграммы моментов от опоры $A$

$$x'_{A_2} = \frac{\sum S_i x'_{ci}}{\sum S_i} = \frac{3{,}97 \cdot 49{,}7 + 2{,}05 \cdot 84{,}1 + 1{,}62 \cdot 111 + 1{,}57 \cdot 157 + 0{,}31 \cdot 234{,}1}{9{,}48} = 93{,}5 \text{ см}.$$

23. Координаты центров тяжести площадей диаграммы моментов относительно центра тяжести половины ротора

$$x_{ci} = x_{A_2} - x'_{ci}.$$

Результаты расчета по пунктам 17—23 сводим в табл. 94.



*Таблица 94*

**Расчетные данные**

| № сечений | $d_i$ | $x_i$ | $I_{xi} \times 10^{-4}$ | $Q_i$ | $x'_i$ | $M_{xi} \times 10^{-4}$ | $M'_{xi} \times 10^{-5}$ | $M''_{xi} \times 10^{5}$ | $x'_{ci}$ | $S_i \times 10^{-8}$ | $x_{ci}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $i$ | (в см) | (в см) | (в см⁴) | (в кг) | (в см) | (в кгсм) | (в кгсм) | (в кгсм) | (в см) | (в кгсм)² | (в см) |
| 1 | 28,0 | 74,5 | 2,97 | 310,0 | 37,2 | 20,85 | 105,5 | 91,5 | 49,7 | 3,93 | 162,3 |
| 2 | 29,0 | 94,5 | 3,42 | 91,2 | 84,5 | 26,04 | 114,0 | 39,7 | 84,1 | 2,05 | 127,9 |
| 3 | 37,5 | 129,0 | 9,50 | 276,0 | 111,8 | 34,36 | 54,0 | 23,5 | 111,0 | 1,62 | 101,0 |
| 4 | 46,0 | 187,5 | 21,93 | 1505,0 | 158,0 | 44,37 | 30,2 | 4,44 | 157,0 | 1,57 | 55,0 |
| 5 | 80,9 | 327,5 | 150,00 | 5740,0 | 257,5 | 00,00 | 0 | 0 | 234,1 | 0,31 | 22,1 |

24. Реакция опоры $A$ от действия диаграммы моментов как нагрузки

$$R'_{A_2} = \frac{S}{x_A}(x_A - x'_{A_2}) = \frac{9.48 \cdot 10^8}{327{,}5} \cdot (327{,}5 - 93{,}5) = 6{,}77 \cdot 10^8 \text{ кг см}^2.$$

25. Прогиб под центром тяжести левой половины ротора

$$y_{A_2} = f_{A_2} = \frac{1}{EI_0}[R'_{A_2}x_{A_2} - (S_1x_{c1} + S_2x_{c2} + S_3x_{c3} + S_4x_{c4} + S_5x_{c5})] =$$

$$= \frac{1 \cdot 10^8}{3{,}3 \cdot 10^{12}}[6{,}77 \cdot 212 - (3{,}93 \cdot 162{,}3 + 2{,}05 \cdot 127{,}9 + 1{,}62 \cdot 101 + 1{,}57 \cdot 55 + 0{,}31 \cdot 22{,}1)] = \frac{2{,}8}{3{,}3} \cdot 10^{-2} = 0{,}0085 \text{ см}.$$

Более просто вести расчет по правой опоре:

$$R'_{в2} = \frac{S}{x_A} \cdot x'_{A2} = \frac{9{,}48 \cdot 10^8}{327} \cdot 93{,}5 = 2{,}71 \cdot 10^8$$

$$y_{A2} = f_{A2} \approx \frac{1}{EI_0}\left(R'_{в2}\,x_{в2} - S_5\,x_{c_5}\right) = \frac{10^8}{3{,}3 \cdot 10^{12}}\left(2{,}71 \cdot 115{,}5 - 0{,}31 \cdot 93{,}4\right) = 0{,}0086$$

26. Вторая критическая скорость ротора

$$n_{кр2} = 315\sqrt{\frac{1}{f_2}} = 315\sqrt{\frac{1}{0{,}0085}} = 3430 \text{ об/мин}.$$

Полученное расхождение результатов при определении прогибов и критических скоростей ротора аналитическим методом и по методу гл. 8 объясняется тем, что в первом случае при определении весов $q_i$ взят вес только поковки ротора.

Вторая критическая скорость получилась близкой к угонной, поэтому требуется более точный ее расчет и, в случае необходимости изменения жесткости ротора. Учет различной жесткости ротора по осям большого и малых зубцов может быть произведен по [131] путем определения двух значений $I_{01}$ и $I_{02}$

$$I_{01,2} = \frac{\pi D_R^4}{64} - FR^2 Z_R(1 \pm \alpha),$$

где $F$ — площадь сечения паза, $R$ — радиус инерции сечения паза, $Z_R$ — число зубцов, $N_R$ — число зубцовых делений.

$$\alpha \approx \frac{\operatorname{Sin} \pi\gamma}{\pi\gamma}, \quad \gamma = \frac{Z_R}{N_R}$$

Для определения $I_0$ по оси большого зуба во втором члене в скобках следует взять знак минус.

*Приложение 1*

## ДИАМЕТРЫ ЯКОРЕЙ СЕРИЙНЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И СТАТОРОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА:

*Таблица 1*

**Новая серия асинхронных и синхронных машин (А и С)**

| Габарит | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{j_1}$ (в *мм*) | 102 | 128 | 145 | 182 | 245 | 327 | 368 | 423 | 493 | 590 |
| Габарит | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | — |
| $D_{j_1}$ (в *мм*) | 740 | 850 | 990 | 1180 | 1480 | 1960 | 2600 | 3300 | 4250 | — |

*Таблица 2*

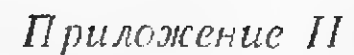
**Новая серия машин постоянного тока П мощностью 0,3—200 *квт***

| Габарит | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | — |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D$ (в *мм*) | 83 | 106 | 120 | 138 | 162 | 195 | 210 | 245 | 294 | 327 | 368 | — |

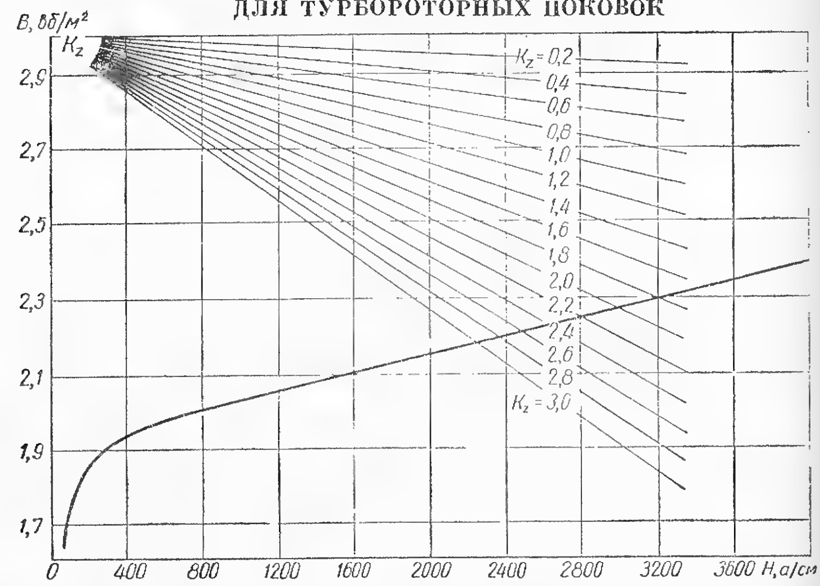
*Таблица 3*

**Старые серии синхронных машин**

| Габарит | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{j_1}$ (в *мм*) | 493 | 560 | 650 | 730 | 850 | 990 | 1160 | 1400 |
| Габарит | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| $D_{j_1}$ (в *мм*) | 1700 | 2130 | 2500 | 2900 | 3250 | 3750 | 4250 | 5250 |

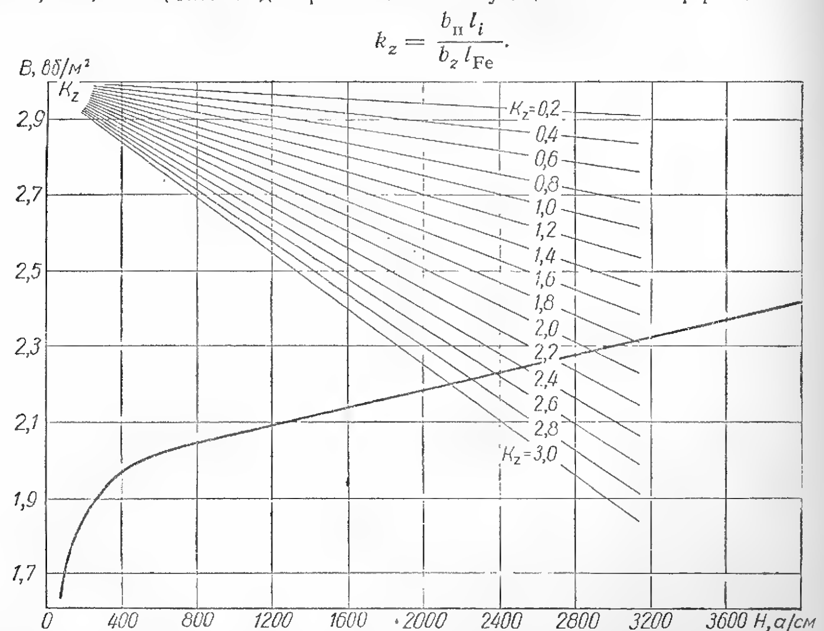

*Приложение II*


## СТАЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ТОНКОЛИСТОВАЯ И СТАЛЬ ДЛЯ ТУРБОРОТОРНЫХ ПОКОВОК




Кривая намагничивания листовой электротехнической стали Э11, Э12, Э21 (таб. 2) для различных зубцовых коэффициентов

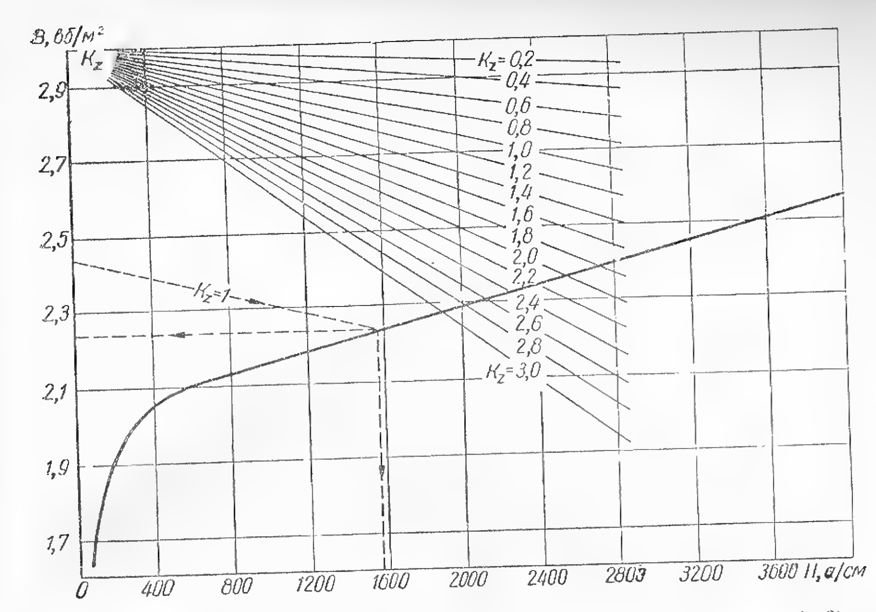
$$k_z = \frac{b_п\, l_i}{b_z\, l_{Fe}}.$$



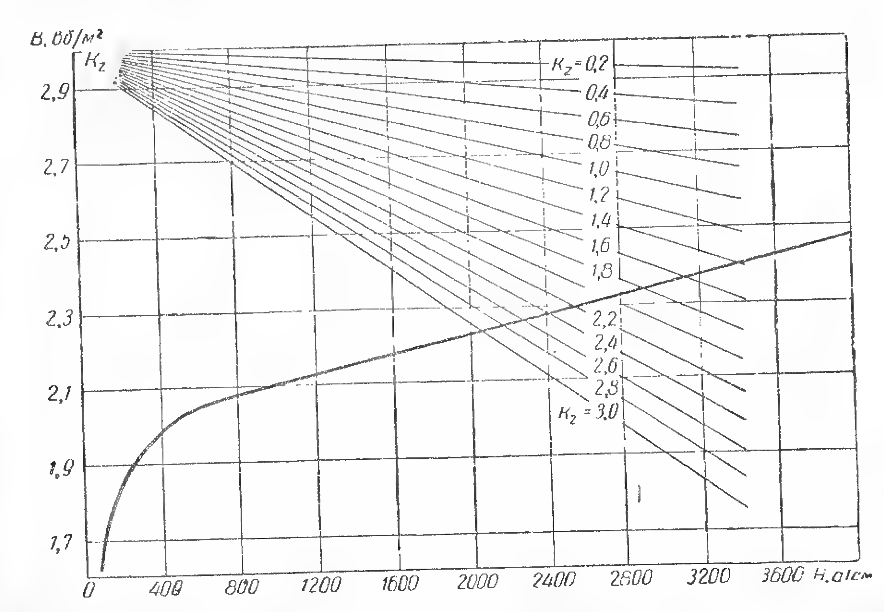

Кривая намагничивания листовой электротехнической стали Э41, Э42 (таб. 3) для различных зубцовых коэффициентов

$$k = \frac{b_п\, l_i}{b_z\, l_{Fe}}.$$






Кривая намагничивания турбороторных поковок (таб. 6) для турбогенераторов мощностью до 25 000 *квт* (включительно) для различных зубцовых коэффициентов $k_z = \frac{b_п}{b_z}\frac{l_i}{l_{Fe}}$.




Кривая намагничивания турбороторных поковок (таб. 7) для турбогенераторов мощностью свыше 50 000 *квт* для различных зубцовых коэффициентов $k_z = \frac{b_п}{b_z}\frac{l_i}{l_{Fe}}$.

*Таблица 1*

**Основные свойства тонколистовой электротехнической стали (ГОСТ 802—54)**

| Марка стали | | Толщина листов (в мм) | Размеры листов (в мм) | Удельный вес (в г/см³) | Удельное сопротивление в ом см | Удельные потери (в вт/кг) | | | | Магнитная индукция (в вб/м²) при напряженности поля (в а/см) | | | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ГОСТ 802-54 | ГОСТ 802-41 | | | | | $p_{10/50}$ | $p_{15/50}$ | $p_{7,5/400}$ | $p_{10/400}$ | $B_5$ | $B_{10}$ | $B_{25}$ | $B_{50}$ | $B_{100}$ | $B_{300}$ | |
| Э11 | Э1, Э1А, Э1АА | 1,0 | 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,80 | $0{,}25 \cdot 10^{-5}$ | 5,80 | 13,4 | — | — | — | — | 1,50 | 1,62 | 1,75 | 1,97 | Слаболегированная Si = (0,8—1,8) %, гарантированы свойства при $f = 50$ гц |
| | | 0,5 | 600×1200; 670×1340; 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,80 | $0{,}25 \cdot 10^{-5}$ | 3,30 | 7,9 | — | — | — | — | 1,50 | 1,62 | 1,75 | 1,97 | |
| Э12 | Э1АБ, Э1ААБ | 0,5 | 600×1200; 670×1340; 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,80 | $0{,}25 \cdot 10^{5}$ | 2,80 | 6,8 | — | — | — | — | 1,49 | 1,69 | 1,74 | 1,96 | То же |
| Э21 | Э2, Э2Б, сталь 1 | 0,5 | 600×1200; 670×1340; 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,75 | $0{,}4 \cdot 10^{-5}$ | 2,50 | 6,1 | — | — | — | — | 1,48 | 1,59 | 1,73 | 1,94 | Среднелегированная Si = (1,8—2,8) %, гарантированы свойства при $f = 50$ гц |
| Э31 | Э3, Э3А, сталь 2 | 0,5 | 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{5}$ | 2,00 | 4,5 | — | — | — | — | 1,46 | 1,57 | 1,70 | 1,90 | Повышеннолегированная Si=(2,8—4) %, горячекатанная |
| | | 0,35 | 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{5}$ | 1,60 | 3,6 | — | — | — | — | 1,46 | 1,57 | 1,70 | 1,90 | |
| Э41 | Э4 | 0,5 | 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,55 | $0{,}58 \cdot 10^{-5}$ | 1,60 | 3,6 | — | — | — | 1,30 | 1,45 | 1,56 | 1,68 | 1,88 | Высоколегированная Si = (4—4,8) %, гарантированы свойства при $f = 50$ гц |
| | | 0,35 | 750×1500; 1000×2000 | 7,55 | $0{,}58 \cdot 10^{-5}$ | 1,35 | 3,2 | — | — | — | 1,30 | 1,45 | 1,56 | 1,68 | 1,88 | |
| Э42 | Э4А | 0,5 | 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,55 | $0{,}58 \cdot 10^{-5}$ | 1,40 | 3,2 | — | — | — | 1,29 | 1,44 | 1,55 | 1,67 | 1,87 | То же |
| | | 0,35 | 750×1500; 1000×2000 | 7,55 | $0{,}58 \cdot 10^{-5}$ | 1,20 | 2,8 | — | — | — | 1,29 | 1,44 | 1,55 | 1,67 | 1,87 | |
| Э43 | Э4АА | 0,5 | 750×1500; 860×1720; 1000×2000 | 7,55 | $0{,}58 \cdot 10^{-5}$ | 1,25 | 2,9 | — | — | — | 1,28 | 1,43 | 1,54 | 1,66 | 1,87 | То же |
| | | 0,35 | 750×1500; 1000×2000 | 7,55 | $0{,}58 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 2,5 | — | — | — | 1,28 | 1,43 | 1,54 | 1,66 | 1,87 | |
| Э44 | ВЧ-1 ВЧ-2, сталь 2 | 0,35 | 750×1500; | 7,55 | $0{,}57 \cdot 10^{-5}$ | — | — | 10,7 | 19,0 | 1,18 | 1,29 | 1,43 | — | — | — | Высоколегированная Si = (4—4,8) %, гарантированы свойства при $f = 400$ гц |
| | | 0,2 | | | | | | 9.2 | 12.5 | | | | | | | |
| | | 0,15 | | | | | | 6.8 | 11,7 | 1,16 | 1,28 | 1,41 | — | — | — | |
| | | 0,1 | 700×120; 700×1400 | | | | | 6.0 | 10,5 | 1,15 | 1,27 | 1,40 | — | — | — | |
| Э310 | ХВП | 0,5 | 600×1500; 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 1,25 | 2,9 | 3,8 | — | — | 1,57 | 1,70 | 1,80 | 1,90 | 1,98 | Повышеннолегированная холоднокатанная Si = (2,5—3,5) %, гарантированы свойства при $f = 50$ гц |
| | | 0,35 | 240×1500; 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 1,00 | 2,2 | 3,2 | — | — | 1,57 | 1,70 | 1,80 | 1,90 | 1,98 | |
| Э320 | ХТ-18 | 0,5 | 600×1500; 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 2,5 | 3,5 | — | — | 1,65 | 1,80 | 1,87 | 1,92 | 2,00 | |
| | | 0,35 | 240×1500; 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 0,90 | 1,9 | 2,9 | — | — | 1,65 | 1,80 | 1,87 | 1,92 | 2,00 | |
| Э330 | ХТ-18,5 | 0,5 | 600×1500; 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 1,05 | 2,3 | 3,2 | — | — | 1,70 | 1,85 | 1,90 | 1,95 | 2,00 | |
| | | 0,35 | 240×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | 0,80 | 1,7 | 2,6 | — | — | 1,70 | 1,85 | 1,90 | 1,95 | 2,00 | |
| Э34 | | 0,35 | 750×1500 | 7,65 | $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ | — | — | 13,0 | 23,0 | 1,18 | 1,30 | 1,45 | — | — | — | |
| Э340 | | 0,35 | 240×1500; 750×1500 | 7,65 | $0{,}47 \cdot 10^{-5}$ | — | — | 12,0 | 21,0 | 1,46 | 1,57 | 1,70 | — | — | — | |
| | | 0,2 | 240×1500 | 7,65 | $0{,}47 \cdot 10^{-5}$ | — | — | 7,0 | 12,0 | 1,40 | 1,55 | 1,67 | — | — | — | |

*Таблица 2*

**Кривая намагничивания для стали Э11, Э12 и Э21 толщиной 0,5 *мм* [*B* (в *вб/м*$^2$), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,4 | 1,40 | 1,43 | 1,46 | 1,49 | 1,52 | 1,55 | 1,58 | 1,61 | 1,64 | 1,67 |
| 0,5 | 1,71 | 1,75 | 1,79 | 1,83 | 1,87 | 1,91 | 1,95 | 1,99 | 2,03 | 2,07 |
| 0,6 | 2,11 | 2,16 | 2,21 | 2,26 | 2,31 | 2,36 | 2,41 | 2,46 | 2,51 | 2,56 |
| 0,7 | 2,61 | 2,66 | 2,71 | 2,76 | 2,81 | 2,87 | 2,93 | 2,99 | 3,06 | 3,12 |
| 0,8 | 3,18 | 3,24 | 3,30 | 3,37 | 3,44 | 3,52 | 3,60 | 3,69 | 3,78 | 3,87 |
| 0,9 | 3,97 | 4,07 | 4,17 | 4,27 | 4,37 | 4,47 | 4,58 | 4,69 | 4,8 | 4,91 |
| 1,0 | 5,02 | 5,14 | 5,27 | 5,41 | 5,55 | 5,7 | 5,85 | 6,0 | 6,15 | 6,31 |
| 1,1 | 6,47 | 6,64 | 6,82 | 7,01 | 7,20 | 7,39 | 7,59 | 7,79 | 8,0 | 8,21 |
| 1,2 | 8,43 | 8,66 | 8,91 | 9,18 | 9,46 | 9,76 | 10,1 | 10,4 | 10,7 | 11,0 |
| 1,3 | 11,4 | 11,8 | 12,2 | 12,6 | 13,0 | 13,4 | 13,8 | 14,3 | 14,8 | 15,3 |
| 1,4 | 15,8 | 16,4 | 17,1 | 17,8 | 18,6 | 19,5 | 20,5 | 21,5 | 22,6 | 23,8 |
| 1,5 | 25,0 | 26,4 | 27,9 | 29,5 | 30,1 | 32,8 | 34,6 | 36,6 | 39,0 | 41,5 |
| 1,6 | 44 | 47 | 50 | 53 | 56 | 59 | 62,5 | 66 | 70 | 74 |
| 1,7 | 78 | 82 | 86,5 | 91 | 95,5 | 100 | 106 | 112 | 118 | 124 |
| 1,8 | 130 | 137 | 144 | 152 | 161 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| 1,9 | 220 | 230 | 240 | 250 | 261 | 273 | 286 | 300 | 314 | 328 |
| 2,0 | 342 | 356 | 370 | 390 | 410 | 430 | 455 | 495 | 545 | 595 |

*Таблица 2а*

**Кривая намагничивания стали Э11, Э12 для зубцов с заранее учтенным уплощением [*B* (в *вб/м*$^2$), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 0,8 | 0,83 | 0,86 | 0,89 | 0,92 | 0,95 | 0,98 | 1,01 | 1,04 | 1,07 |
| 0,3 | 1,1 | 1,13 | 1,16 | 1,19 | 1,22 | 1,25 | 1,28 | 1,31 | 1,34 | 1,37 |
| 0,4 | 1,4 | 1,43 | 1,46 | 1,49 | 1,52 | 1,55 | 1,58 | 1,61 | 1,64 | 1,67 |
| 0,5 | 1,71 | 1,74 | 1,78 | 1,81 | 1,85 | 1,88 | 1.92 | 1,95 | 1,99 | 2.03 |
| 0,6 | 2,06 | 2,1 | 2,14 | 2,18 | 2,22 | 2,27 | 2,31 | 2,35 | 2,4 | 2.44 |
| 0,7 | 2.48 | 2,53 | 2,58 | 2,62 | 2,67 | 2,72 | 2,77 | 2,82 | 2,87 | 2.92 |
| 0,8 | 2,97 | 3,02 | 3,07 | 3,12 | 3.18 | 3.23 | 3,29 | 3,34 | 3,4 | 3.46 |
| 0,9 | 3,52 | 3,58 | 3,64 | 3,7 | 3,77 | 3,83 | 3,91 | 3,98 | 4,06 | 4.14 |
| 1,0 | 4,22 | 4,31 | 4,4 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5.1 |
| 1,1 | 5,21 | 5,32 | 5,44 | 5,56 | 5,66 | 5,77 | 5,89 | 6,01 | 6,14 | 6.26 |
| 1,2 | 6,4 | 6,54 | 6,69 | 6,84 | 6,99 | 7,14 | 7,29 | 7,45 | 7,62 | 7,8 |
| 1,3 | 7,98 | 8,17 | 8,35 | 8,52 | 8,71 | 8,91 | 9,11 | 9,33 | 9,55 | 9,78 |
| 1,4 | 10,0 | 10,3 | 10,6 | 10,9 | 11,2 | 11,6 | 11,9 | 12,2 | 12,5 | 12,9 |
| 1,5 | 13,2 | 13,55 | 13,9 | 14,3 | 14,7 | 15,1 | 15,5 | 15,9 | 16,4 | 16.9 |
| 1,6 | 17,3 | 17,8 | 18,4 | 19,0 | 19,7 | 20,5 | 21,3 | 22,1 | 23,1 | 24,0 |
| 1,7 | 25,0 | 26,1 | 27,3 | 28,4 | 29,7 | 31,0 | 32,4 | 34,0 | 36,7 | 37,6 |
| 1,8 | 39,5 | 41,5 | 43,7 | 45,9 | 48,3 | 50,7 | 53,0 | 55,7 | 58,5 | 61,4 |
| 1,9 | 64,7 | 68,2 | 72,4 | 76,5 | 80,7 | 84,7 | 88,8 | 92,8 | 96,8 | 101 |
| 2,0 | 105 | 110 | 116 | 121 | 126 | 131 | 136,5 | 143 | 149 | 155 |
| 2,1 | 160 | 166 | 172 | 178,5 | 185 | 192 | 199 | 206 | 213 | 221 |
| 2,2 | 230 | 239 | 249 | 260 | 272 | 283 | 293 | 305 | 317 | 330 |



*Таблица 3*

**Кривая намагничивания для стали Э41 и Э42 толщиной 0,5 *мм* [*B* (в *вб/м*$^2$), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,4 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,0 | 1,02 | 1,04 | 1,06 | 1.08 | 1,11 |
| 0,5 | 1,14 | 1,17 | 1,20 | 1,23 | 1,26 | 1,29 | 1,32 | 1,36 | 1,40 | 1,44 |
| 0,6 | 1,48 | 1,52 | 1,56 | 1,60 | 1,64 | 1,68 | 1,72 | 1,77 | 1,82 | 1,87 |
| 0,7 | 1,92 | 1,97 | 2,02 | 2,08 | 2,14 | 2,20 | 2,26 | 2,33 | 2,40 | 2,47 |
| 0,8 | 2,54 | 2,61 | 2,68 | 2,75 | 2,82 | 2,89 | 2,96 | 3,03 | 3,10 | 3,17 |
| 0,9 | 3,25 | 3,33 | 3,41 | 3,49 | 3,58 | 3,67 | 3,76 | 3,85 | 3,94 | 4,04 |
| 1,0 | 4,14 | 4,24 | 4,35 | 4,46 | 4,58 | 4,70 | 4,83 | 4,96 | 5,1 | 5,24 |
| 1,1 | 5,38 | 5,53 | 5,69 | 5,86 | 6,04 | 6,23 | 6,43 | 6,64 | 6,85 | 7,07 |
| 1,2 | 7,3 | 7,54 | 7,8 | 8,1 | 8,4 | 8,7 | 9,0 | 9,4 | 9,8 | 10,3 |
| 1,3 | 10,8 | 11,4 | 12,0 | 12,7 | 13,4 | 14,1 | 14,9 | 15,9 | 17,0 | 18,2 |
| 1,4 | 19,4 | 20,6 | 22,0 | 23,4 | 25 | 27 | 29,2 | 31,4 | 33,7 | 36,0 |
| 1,5 | 38,3 | 40,6 | 42,9 | 45,2 | 47,6 | 50 | 53 | 56,5 | 60,0 | 63,5 |
| 1,6 | 67 | 71 | 76 | 81 | 86,5 | 93 | 100 | 107 | 114 | 122 |
| 1,7 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 |
| 1,8 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 | 312 | 325 |
| 1,9 | 340 | 355 | 370 | 385 | 405 | 425 | 450 | 510 | 570 | 630 |
| 2,0 | 700 | 770 | 845 | 920 | 1000 | 1080 | 1160 | 1240 | 1320 | 1400 |

*Таблица 3а*

**Кривая намагничивания для стали Э41 и Э42 для зубцов с заранее учтенным уплощением [*B* (в *вб/м*$^2$), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | 1,14 | 1,15 | 1,16 | 1,18 | 1,21 | 1,24 | 1,26 | 1,29 | 1,32 | 1,35 |
| 0,6 | 1,38 | 1,41 | 1,44 | 1,47 | 1,5 | 1,53 | 1,57 | 1,61 | 1,65 | 1,7 |
| 0,7 | 1,74 | 1,78 | 1,82 | 1,86 | 1,9 | 1,94 | 1,98 | 2,02 | 2,07 | 2,12 |
| 0,8 | 2,18 | 2,24 | 2,3 | 2,36 | 2,42 | 2,48 | 2,54 | 2,6 | 2,66 | 2,72 |
| 0,9 | 2,77 | 2,83 | 2.89 | 2,96 | 3,03 | 3,10 | 3,17 | 3,24 | 3,32 | 3,39 |
| 1,0 | 3,46 | 3,53 | 3.61 | 3,68 | 3,75 | 3,84 | 3,94 | 4,03 | 4,11 | 4,19 |
| 1,1 | 4,29 | 4,38 | 4,47 | 4,56 | 4,66 | 4,76 | 4,77 | 4,89 | 5,02 | 5,15 |
| 1,2 | 5,28 | 5,43 | 5,58 | 5,64 | 5,76 | 5,94 | 6,08 | 6,21 | 6,4 | 6,56 |
| 1,3 | 6,66 | 6,86 | 7,06 | 7,26 | 7,46 | 7,66 | 7,89 | 8.12 | 8,37 | 8,61 |
| 1,4 | 8,85 | 9,1 | 9,35 | 9,6 | 9,85 | 10,2 | 10,5 | 10,85 | 11,3 | 11,9 |
| 1,5 | 12,5 | 13,1 | 13,7 | 14,3 | 15,0 | 15,7 | 16,4 | 17,2 | 18,0 | 18,8 |
| 1,6 | 19,6 | 20,9 | 22,2 | 23,8 | 25,4 | 27,0 | 28,6 | 30,2 | 32 | 33,7 |
| 1,7 | 36,5 | 38,9 | 41,6 | 44,0 | 46,4 | 48,8 | 51,2 | 53,6 | 55 | 57,8 |
| 1,8 | 61,1 | 64,1 | 67,1 | 70,1 | 73,2 | 76,3 | 79,6 | 85 | 90,3 | 96,3 |
| 1,9 | 103 | 111 | 119 | 127 | 135 | 143 | 151 | 159 | 167 | 175 |
| 2,0 | 184 | 193 | 202 | 211 | 221 | 231 | 241 | 252 | 264 | 276 |
| 2,1 | 289 | 301 | 313 | 325 | 337 | 349 | 361 | 373 | 385 | 397 |
| 2,2 | 410 | 434 | 458 | 482 | 506 | 531 | 556 | 590 | 624 | 658 |

*Таблица 4*

**Кривая намагничивания для стали Э11, Э12 и Э21 толщиной 0,5 *мм* на ярмо [*B* (в *вб/м²*), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,1** | 0,37 | 0,39 | 0,41 | 0,44 | 0,46 | 0,48 | 0,5 | 0,52 | 0,54 | 0,55 |
| **0,2** | 0,57 | 0,59 | 0,6 | 0,62 | 0,63 | 0,65 | 0,67 | 0,68 | 0,7 | 0,71 |
| **0,3** | 0,72 | 0,74 | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,8 | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,87 |
| **0,4** | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,98 | 1,0 | 1,02 | 1,04 | 1,06 |
| **0,5** | 1,08 | 1,1 | 1,13 | 1,15 | 1,18 | 1,2 | 1,22 | 1,24 | 1,26 | 1,28 |
| **0,6** | 1,31 | 1,34 | 1,36 | 1,39 | 1,41 | 1,44 | 1,47 | 1,5 | 1,53 | 1,56 |
| **0,7** | 1,59 | 1,63 | 1,66 | 1,69 | 1,72 | 1,76 | 1,8 | 1,83 | 1,86 | 1,89 |
| **0,8** | 1,93 | 1,97 | 2,01 | 2,04 | 2,08 | 2,12 | 2,16 | 2,2 | 2,23 | 2,27 |
| **0,9** | 2,31 | 2,35 | 2,39 | 2,43 | 2,48 | 2,52 | 2,55 | 2,6 | 2,65 | 2,69 |
| **1,0** | 2,74 | 2,79 | 2,84 | 2,89 | 2,95 | 3,0 | 3,05 | 3,11 | 3,18 | 3,25 |
| **1,1** | 3,32 | 3,38 | 3,44 | 3,51 | 3,58 | 3,66 | 3,74 | 3,82 | 3,9 | 3,98 |
| **1,2** | 4,07 | 4,16 | 5,26 | 4,35 | 4,44 | 4,55 | 4,65 | 4,75 | 4,86 | 4,98 |
| **1,3** | 5,09 | 5,21 | 5,33 | 5,46 | 5,58 | 5,72 | 5,85 | 6,0 | 6,17 | 6,35 |
| **1,4** | 6,55 | 6,75 | 6,95 | 7,17 | 7,4 | 7,64 | 7,89 | 8,15 | 8,43 | 8,72 |
| **1,5** | 9,02 | 9,34 | 9,65 | 10,0 | 10,4 | 10,9 | 11,4 | 11,9 | 12,4 | 12,9 |
| **1,6** | 13,6 | 14,4 | 15,2 | 15,9 | 16,6 | 17,4 | 18,2 | 19,1 | 20,1 | 21,1 |
| **1,7** | 22,1 | 23,1 | 24,1 | 25,1 | 26,1 | 27,2 | 28,7 | 30,2 | 32 | 34 |
| **1,8** | 36 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 | — | — | — | — |

*Таблица 5*

**Кривая намагничивания для стали Э41 и Э42 толщиной 0,5 *мм* на ярмо [*B* (в *вб/м²*), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,6** | 0,94 | 0,96 | 0,98 | 1,0 | 1,03 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,15 | 1,18 |
| **0,7** | 1,21 | 1,24 | 1,27 | 1,3 | 1,33 | 1,36 | 1,39 | 1,43 | 1,47 | 1,51 |
| **0,8** | 1,55 | 1,59 | 1,63 | 1,67 | 1,71 | 1,75 | 1,79 | 1,83 | 1,88 | 1,93 |
| **0,9** | 1,98 | 2,03 | 2,08 | 2,13 | 2,18 | 2,23 | 2,28 | 2,33 | 2,38 | 2,43 |
| **1,0** | 2,48 | 2,53 | 2,58 | 2,63 | 2,68 | 2,73 | 2,78 | 2,83 | 2,88 | 2,93 |
| **1,1** | 2,98 | 3,03 | 3,08 | 3,13 | 3,18 | 3,24 | 3,3 | 3,36 | 3,44 | 3,52 |
| **1,2** | 3,6 | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,02 | 4,14 | 4,26 | 4,4 | 4,55 | 4,7 |
| **1,3** | 4,88 | 5,06 | 5,25 | 5,45 | 5,7 | 6,0 | 6,3 | 6,6 | 6,9 | 7,2 |
| **1,4** | 7,6 | 8,1 | 8,6 | 9,0 | 9,4 | 9,8 | 10,2 | 10,7 | 11,2 | 11,6 |
| **1,5** | 12 | 12,5 | 13 | 13,5 | 14,1 | 14,8 | 15,6 | 16,5 | 17,4 | 18,4 |
| **1,6** | 19,4 | 20,4 | 21,4 | 22,4 | 23,4 | 25,5 | 26,7 | 28 | 29,5 | 31 |
| **1,7** | 33 | 35 | 37 | 39 | 41 | 43 | — | — | — | — |



*Таблица 6*

**Кривая намагничивания турбороторных поковок для турбогенераторов мощностью до 25 000 *квт* (включительно) [*B* (в *вб/м²*), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,1** | 0,75 | 0,83 | 0,9 | 0,98 | 1,05 | 1,13 | 1,2 | 1,28 | 1,35 | 1,43 |
| **0,2** | 1,5 | 1,58 | 1,65 | 1,73 | 1,8 | 1,88 | 1,95 | 2,02 | 2,1 | 2,18 |
| **0,3** | 2,25 | 2,33 | 2,40 | 2,48 | 2,55 | 2,63 | 2,7 | 2,78 | 2,85 | 2,93 |
| **0,4** | 3,0 | 3,08 | 3,15 | 3,23 | 3,3 | 3,38 | 3,45 | 3,53 | 3,6 | 3,68 |
| **0,5** | 3,75 | 3,83 | 3,88 | 3,93 | 4,0 | 4,08 | 4,15 | 4,23 | 4,3 | 4,38 |
| **0,6** | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,4 |
| **0,7** | 5,5 | 5,65 | 5,8 | 5,95 | 6,1 | 6,25 | 6,4 | 6,55 | 6,7 | 6,85 |
| **0,8** | 7,0 | 7,15 | 7,30 | 7,45 | 7,60 | 7,75 | 7,9 | 8,05 | 8,2 | 8,35 |
| **0,9** | 8,5 | 8,65 | 8,8 | 8,95 | 9,1 | 9,25 | 9,4 | 9,55 | 9,7 | 9,85 |
| **1,0** | 10,0 | 10,2 | 10,4 | 10,6 | 10,8 | 11,0 | 11,2 | 11,4 | 11,6 | 11,8 |
| **1,1** | 12,0 | 12,4 | 12,8 | 13,2 | 13,6 | 14,0 | 14,4 | 14,8 | 15,2 | 15,7 |
| **1,2** | 16,2 | 16,7 | 17,2 | 17,7 | 18,2 | 18,8 | 19,4 | 20,0 | 20,6 | 21,2 |
| **1,3** | 21,8 | 22,4 | 23,0 | 23,7 | 24,5 | 25,2 | 26,0 | 26,8 | 27,7 | 28,6 |
| **1,4** | 29,5 | 30,5 | 31,5 | 32,6 | 33,7 | 34,8 | 36 | 37,2 | 38,4 | 39,7 |
| **1,5** | 41 | 42,5 | 44 | 45,5 | 47 | 48,5 | 50,3 | 52,2 | 54,3 | 57 |
| **1,6** | 59,5 | 62,2 | 65 | 68 | 71 | 74 | 77 | 81 | 85 | 89,2 |
| **1,7** | 93,5 | 97,5 | 102 | 107 | 113 | 119 | 125 | 131 | 137 | 144 |
| **1,8** | 151 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 212 | 223 | 234 | 245 |
| **1,9** | 256 | 268 | 280 | 292 | 305 | 320 | 340 | 360 | 385 | 410 |
| **2,0** | 435 | 460 | 490 | 525 | 570 | 620 | 675 | 740 | 810 | 880 |

*Таблица 7*

**Кривая намагничивания турбороторных поковок для турбогенераторов мощностью свыше 50 000 *квт* (включительно) [*B* (в *вб/м²*), *H* (в *а/см*)]**

| *B* | 0,0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,1** | 5,4 | 5,49 | 5,58 | 5,67 | 5,76 | 5,85 | 5,94 | 6,03 | 6,12 | 6,21 |
| **0,2** | 6,3 | 6,39 | 6,48 | 6,57 | 6,66 | 6,75 | 6,84 | 6,93 | 7,02 | 7,11 |
| **0,3** | 7,2 | 7,29 | 7,39 | 7,47 | 7,56 | 7,65 | 7,74 | 7,83 | 7,92 | 8,01 |
| **0,4** | 8,1 | 8,19 | 8,28 | 8,37 | 8,46 | 8,55 | 8,64 | 8,73 | 8,82 | 8;91 |
| **0,5** | 9,0 | 9,09 | 9,18 | 9,27 | 9,36 | 9,45 | 9,54 | 9,63 | 9,72 | 9,81 |
| **0,6** | 9,9 | 9,99 | 10,08 | 10,17 | 10,26 | 10,35 | 10,44 | 10,53 | 10,62 | 10,71 |
| **0,7** | 10,8 | 10,89 | 10,98 | 11,07 | 11,16 | 11,25 | 11,34 | 11,43 | 11,52 | 11,61 |
| **0,8** | 11,7 | 11,79 | 11,88 | 11,97 | 12,06 | 12,15 | 12,24 | 12,33 | 12,42 | 12,51 |
| **0,9** | 12,6 | 12,69 | 12,78 | 12,87 | 12,96 | 13,05 | 13,14 | 13,23 | 13,32 | 13,41 |
| **1,0** | 13,5 | 13,59 | 13,68 | 13,77 | 13,86 | 13,95 | 14,04 | 14,13 | 14,22 | 14,31 |
| **1,1** | 14,4 | 14,49 | 14,58 | 14,67 | 14,76 | 14,85 | 14,94 | 15,03 | 15,12 | 15,21 |
| **1,2** | 15,3 | 15,48 | 15,66 | 15,84 | 16,02 | 16,2 | 16,44 | 16,68 | 16,92 | 17,16 |
| **1,3** | 17,4 | 17,96 | 18,52 | 19,08 | 19,64 | 20,2 | 20,76 | 21,3 | 21,88 | 22,44 |
| **1,4** | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31,3 | 32,6 |
| **1,5** | 34 | 35,4 | 36,8 | 38,2 | 39,6 | 41 | 42,8 | 44,6 | 46,4 | 48,2 |
| **1,6** | 50 | 53 | 56 | 59 | 62 | 65 | 68 | 71 | 74 | 77 |
| **1,7** | 80 | 83 | 86 | 90 | 94 | 99 | 104 | 109 | 114 | 120 |
| **1,8** | 128 | 135 | 142 | 150 | 160 | 170 | 180 | 200 | 220 | 240 |
| **1,9** | 260 | 305 | 350 | 395 | 463 | 530 | 600 | 727 | 854 | 980 |
| **2,0** | 1060 | 1140 | 1220 | 1300 | 1380 | 1460 | 1540 | 1620 | 1700 | 1780 |

*Таблица 8*

**Кривая намагничивания стали для полюсов толщиной 1 ÷ 1,75 *мм* [$B$ (в *вб/м²*), $H$ (в *а/см*)]**

| $B$ | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 0,2 | 1,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 0,3 | 1,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 0,4 | 2,1 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 0,5 | 2,5 | — | — | — | — | 2,75 | — | — | — | |
| 0,6 | 2,95 | — | — | — | — | 3,2 | — | — | — | |
| 0,7 | 3,45 | — | — | — | — | 3,75 | — | — | — | |
| 0,8 | 4,05 | — | — | — | — | 4,4 | — | — | — | |
| 0,9 | 4,8 | 4,9 | 4,95 | 5,05 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,4 | 5,5 | 5,6 |
| 1,0 | 5,7 | 5,82 | 5,94 | 6,04 | 6,15 | 6,3 | 6,42 | 6,54 | 6,67 | 6,8 |
| 1,1 | 6,9 | 7,03 | 7,16 | 7,30 | 7,44 | 7,6 | 7,75 | 7,9 | 8,07 | [illegible] |
| 1,2 | 8,43 | 8,6 | 8,8 | 9,0 | 9,2 | 9,4 | 9,6 | 9,85 | 10,15 | [illegible] |
| 1,3 | 10,78 | 11,12 | 11,45 | 11,75 | 12,2 | 12,6 | 13 | 13,5 | 14,0 | 14,5 |
| 1,4 | 14,9 | 15,3 | 15,95 | 16,45 | 17,0 | 17,6 | 18.36 | 19,2 | 20,1 | 21,1 |
| 1,5 | 22,7 | 24,1 | 25,6 | 27,1 | 28,8 | 30,5 | 32,2 | 34,0 | 36 | 38 |
| 1,6 | 40 | 42,5 | 45 | 47,5 | 50 | 52,5 | 55,8 | 59,5 | 62,3 | 66 |
| 1,7 | 70,5 | 75,3 | 79,5 | 84 | 88,5 | 93,2 | 98 | 103 | 108 | 114 |
| 1,8 | 119 | 124 | 129,5 | 135 | 141 | 148 | 155 | 162 | 170 | 178 |
| 1,9 | 187,5 | 197 | 206 | 215 | 225 | 235 | 245 | 255 | 265 | 275 |
| 2,0 | 288 | 302 | 315 | 328 | 342 | 361 | 380 | — | — | — |

*Таблица 9*

**Кривая намагничивания литой стали [$B$ (в *вб/м²*), $H$ (в *а/см*)]**

| $B$ | 0,0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,4 | 1,5 | — | — | — | — | 1,7 | — | — | — | |
| 0,5 | 1,86 | — | — | — | — | 2,08 | — | — | — | |
| 0,6 | 2,3 | — | — | — | — | 2.55 | — | — | — | |
| 0,7 | 2,8 | — | — | — | — | 3,1 | — | — | — | |
| 0,8 | 3,45 | — | — | — | — | 3,85 | — | — | — | |
| 0,9 | 4,37 | 4,4 | 4,5 | 4,61 | 4,78 | 4,9 | 5,0 | 5,15 | 5,3 | [illegible] |
| 1,0 | 5,7 | 5,85 | 6,0 | 6,15 | 6,3 | 6,45 | 6,6 | 6,8 | 7,0 | [illegible] |
| 1,1 | 7,5 | 7,75 | 8,0 | 8,25 | 8,5 | 8,75 | 9,0 | 9,25 | 9,5 | [illegible] |
| 1,2 | 10,0 | 10,35 | 10,7 | 11,1 | 11,5 | 12,0 | 12,4 | 12,8 | 13,2 | [illegible] |
| 1,3 | 14,0 | 14,5 | 15,1 | 15,6 | 16,25 | 16,9 | 17,45 | 18.0 | 18,7 | [illegible] |
| 1,4 | 20,3 | 21,2 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28,5 | 30 |
| 1,5 | 31,5 | 33 | 34,5 | 36 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 | [illegible] |
| 1,6 | 51 | 54 | 57 | 60 | 63 | 66 | 69 | 72,5 | 76 | 80 |
| 1,7 | 84 | 88 | 91,5 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 | [illegible] |
| 1,8 | 130 | 137 | 144 | 150 | 157 | 164 | 171 | 180 | 188 | 196 |
| 1,9 | 205 | 215 | 225 | 232 | 240 | — | — | — | — | |



*Таблица 10*

**Кривая намагничивания серого чугуна [$B$ (в *вб/м²*), $H$ (в *а/см*)]**

| $B$ | 0,0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 1,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0,2 | 4,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0,3 | 8 | 8,5 | 8,7 | 9,0 | — | — | — | — | — | — |
| 0,4 | 12,6 | 13,0 | 13,5 | 14.2 | 15 | 15,7 | 16,3 | 17.0 | 17,6 | 18,3 |
| 0,5 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26,3 | 27,6 | 28,8 |
| 0,6 | 30 | 31,5 | 33 | 34,5 | 36 | 37,5 | 39 | 40,5 | 42 | 43,5 |
| 0,7 | 45 | 47 | 49 | 51 | 53 | 55 | 57 | 59 | 61 | 63 |
| 0,8 | 65 | 67,7 | 70,4 | 73,1 | 78,5 | 78,5 | 81,2 | 84 | 86,6 | 89,3 |
| 0,9 | 92 | 95,8 | 99,6 | 103,6 | 107,2 | 111 | 115 | 119 | 123 | 127 |
| 1,0 | 130 | 137 | 144 | 151 | 158 | 165 | 172 | 179 | 186 | 193 |
| 1,1 | 200 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

*Таблица 11*

**Удельное намагничивание трансформаторной сети и стыков магнитопроводов и удельные потери в трансформаторной стали Э42 при $f = 50$ *гц***

| Индукция (в *вб/м²*) | Потери в стали (в *вт/кг*) | | Намагничивающая мощность | | Индукция (в *вб/м²*) | Потери в стали (в *вт/кг*) | | Намагничивающая мощность | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,35 | 0,5 | (в *ва/кг*) | (в *ва/см²* стыка) | | 0,35 | 0,50 | (в *ва/кг*) | (в *ва/см²* стыка) |
| 0,96 | 1,24 | 1,54 | 4,13 | 0,410 | 1,23 | 2,05 | 2,36 | 11,39 | 1,33 |
| 0,97 | 1,27 | 1,57 | 4,25 | 0,430 | 1,24 | 2,08 | 2,39 | 11,87 | 1,39 |
| 0,98 | 1,29 | 1,60 | 4,39 | 0,453 | 1,25 | 2,11 | 2,42 | 12,35 | 1,45 |
| 0,99 | 1,32 | 1,62 | 4,55 | 0,475 | 1,26 | 2,14 | 2,45 | 12,91 | 1,51 |
| 1,00 | 1,35 | 1,65 | 4,71 | 0,498 | 1,27 | 2,18 | 2,49 | 13,47 | 1,57 |
| 1,01 | 1,37 | 1,67 | 4,87 | 0,522 | 1,28 | 2,22 | 2,52 | 14,1 | 1,63 |
| 1,02 | 1,40 | 1,71 | 5,03 | 0,546 | 1,29 | 2,25 | 2,56 | 14,8 | 1,69 |
| 1,03 | 1,42 | 1,73 | 5,19 | 0,571 | 1,30 | 2,28 | 2,60 | 15,5 | 1,75 |
| 1,04 | 1,46 | 1,76 | 5,35 | 0,597 | 1,31 | 2,32 | 2,63 | 16,3 | 1,81 |
| 1,05 | 1,49 | 1,79 | 5,51 | 0,625 | 1,32 | 2,36 | 2,67 | 17,1 | 1,87 |
| 1,06 | 1,51 | 1,81 | 5,71 | 0,657 | 1,33 | 2,38 | 2,70 | 18,0 | 1,93 |
| 1,07 | 1,55 | 1,85 | 5,91 | 0,689 | 1,34 | 2,41 | 2,74 | 19,0 | 1,99 |
| 1,08 | 1,58 | 1,88 | 6,11 | 0,722 | 1,35 | 2,45 | 2,78 | 20,0 | 2,06 |
| 1,09 | 1,60 | 1,91 | 6,31 | 0,756 | 1,36 | 2,49 | 2,81 | 21,2 | 2,14 |
| 1,10 | 1,63 | 1,95 | 6,51 | 0,79 | 1,37 | 2,53 | 2,84 | 22,4 | 2,22 |
| 1,11 | 1,66 | 1,98 | 6,78 | 0,826 | 1,38 | 2,55 | 2,87 | 23.6 | 2,30 |
| 1,12 | 1,68 | 2,00 | 7,06 | 0,862 | 1,39 | 2,59 | 2,91 | 24,8 | 2,38 |
| 1,13 | 1,71 | 2,04 | 7,37 | 0,899 | 1,40 | 2,62 | 2,95 | 26,0 | 2,46 |
| 1,14 | 1,74 | 2,08 | 7,71 | 0,937 | 1,405 | 2,63 | 2,97 | 26.7 | 2,5 |
| 1,15 | 1,73 | 2,10 | 8,05 | 0,975 | 1,410 | 2,67 | 3,00 | 28,1 | 2,6 |
| 1,16 | 1,80 | 2,13 | 8,41 | 1,02 | 1,425 | 2,70 | 3,03 | 29,5 | 2,7 |
| 1,17 | 1,84 | 2.16 | 8,77 | 1,06 | 1,435 | 2.73 | 3,06 | 31,1 | 2,8 |
| 1,18 | 1,87 | 2,19 | 9,16 | 1,10 | 1,445 | 2,77 | 3.10 | 32,7 | 2,9 |
| 1,19 | 1,91 | 2,22 | 9,58 | 1,14 | 1.455 | 2,80 | 3,14 | 34,4 | 3,0 |
| 1,20 | 1,94 | 2,26 | 10,0 | 1,18 | 1,465 | 2,84 | 3.18 | 36,2 | 3,1 |
| 1,21 | 1,98 | 2,29 | 10,45 | 1,22 | 1,475 | 2,88 | — | 38,0 | 3,2 |
| 1,22 | 2,02 | 2,32 | 10,92 | 1,27 | 1,485 | 2,92 | — | 40,0 | 3,3 |
| 1,23 | 2,05 | 2,36 | 11,39 | 1,33 | 1,495 | 2,96 | — | 42.4 | 3,4 |

*Таблица 12*

**Удельные потери и удельные намагничивания в холоднокатаной стали толщиной 0,5 *мм***

| Индукция (в *вб/м²*) | Удельные потери (в *вт/кг*) | Намагничивающая мощность (в *ва/кг*) | Намагничивающая мощность (*ва/см²* стыка) | Индукция (в *вб/м²*) | Удельные потери (в *вт/кг*) | Намагничивающая мощность (в *ва кг*) | Намагничивающая мощность (в *ва/см²* стыка) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,2 | 1,74 | 5,2 | 0,468 | 1,48 | 2,74 | 17,5 | 1,87 |
| 1,21 | 1,765 | 5,48 | 0,497 | 1,49 | 2,78 | 18,45 | 1,94 |
| 1,22 | 1,795 | 5,76 | 0,528 | 1,5 | 2,82 | 19,4 | 1,98 |
| 1,23 | 1,82 | 6,06 | 0,56 | 1,51 | 2,865 | 20,61 | 2,046 |
| 1,24 | 1,85 | 6,38 | 0,605 | 1,52 | 2.9 | 21,86 | 2.13 |
| 1,25 | 1,88 | 6,7 | 0,639 | 1,53 | 2,945 | 23,2 | 2,19 |
| 1,26 | 1,91 | 7,02 | 0,671 | 1,54 | 2,985 | 24,6 | 2.26 |
| 1,27 | 1,945 | 7,34 | 0,72 | 1,55 | 3,025 | 26,0 | 2,34 |
| 1,28 | 1,795 | 7,7 | 0,767 | 1,56 | 3,075 | 27,6 | 2.42 |
| 1,29 | 2,01 | 8,1 | 0,8 | 1,57 | 3,115 | 29,2 | 2,5 |
| 1,3 | 2,04 | 8,5 | 0,853 | 1,58 | 3.16 | 30,9 | 2,58 |
| 1,31 | 2,076 | 8,82 | 0,902 | 1,59 | 3.2 | 32,7 | 2,65 |
| 1,32 | 2,115 | 9,14 | 0,938 | 1,6 | 3,23 | 34.5 | 2,74 |
| 1,33 | 2,15 | 9,5 | 0,99 | 1,61 | 3,285 | 36,6 | 2,83 |
| 1,34 | 2,186 | 9,9 | 1,04 | 1,62 | 3,34 | 38,8 | 2,92 |
| 1,35 | 2,215 | 10,3 | 1,095 | 1,63 | 3,4 | 41,16 | 3,01 |
| 1,36 | 2,25 | 10,74 | 1,15 | 1,64 | 3,46 | 43,48 | 3,1 |
| 1,37 | 2,29 | 11,18 | 1,2 | 1,65 | 1,353 | 45,8 | 3,19 |
| 1,38 | 2,325 | 11,62 | 1,255 | 1,66 | 3,59 | 47,88 | 3,28 |
| 1,39 | 2,36 | 12,06 | 1,31 | 1,67 | 3,65 | 49,96 | 3,39 |
| 1,4 | 2,38 | 12,5 | 1,37 | 1,68 | 3,71 | 52,7 | 3,49 |
| 1,41 | 2,42 | 12,98 | 1,41 | 1,69 | 3,77 | 56,1 | 3,6 |
| 1,42 | 2,47 | 13,46 | 1,48 | 1,7 | 3,83 | 59,5 | 3,7 |
| 1,43 | 2,51 | 14,04 | 1,5 | 1,71 | 3.9 | 65,7 | 3,8 |
| 1,44 | 2,55 | 14,72 | 1,6 | 1,72 | 3,98 | 71,9 | 3,9 |
| 1,45 | 2,6 | 15,4 | 1,6 | 1,73 | 4,07 | 78,1 | 4,0 |
| 1,46 | 2,65 | 16,08 | 1,7 | 1,74 | 4,14 | 84,3 | 4,0 |
| 1,47 | 2,7 | 16,76 | 1,79 | 1,75 | 4,29 | 90,5 | 4,0 |

*Приложение III*

## ПРОВОДА ОБМОТОЧНЫЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ. КЛАССЫ ИЗОЛЯЦИИ

**«Провода медные обмоточные, шины и ленты медные для электротехнических целей» (ГОСТ 434—54)**

1. Стандарт распространяется на:

а) провода медные круглых и прямоугольных сплошных сечений, изолированнные хлопчатобумажной пряжей, шелком и кабельной бумагой, применяемые в электро-, машино-, и аппаратостроении;

б) шины и ленты медные, а также провода голые прямоугольного сплошного сечения, применяемые для монтажа распределительных устройств и для иных электротехнических целей.

2. В зависимости от применяемой меди голые провода, шины и ленты подразделяются на следующие марки:

МГМ — медные голые мягкие;

МГТ — медные голые твердые.

3. Провода медные обмоточные подразделяются на следующие марки:

ПЭШО — провод, изолированный эмалью и одним слоем шелковой обмотки;

ПЭЛШО — провод, изолированный эмалью (бензиностойкой) и одним слоем шелковой обмотки;



ПБО — провод, изолированный одним слоем хлопчатобумажной обмотки;

ПБД — провод, изолированный двумя слоями хлопчатобумажной обмотки;

ПБТ — провод, изолированный тремя слоями хлопчатобумажной обмотки;

ПЭЛБО — провод, изолированный эмалью (бензиностойкой) и одним слоем хлопчатобумажной обмотки.

ПЭЛБД — провод, изолированный эмалью (бензиностойкой) и двумя слоями хлопчатобумажной обмотки;

ПБОО — провод, изолированный одним слоем хлопчатобумажной обмотки и одной хлопчатобумажной оплеткой;

ПББО — провод, изолированный несколькими слоями ленты из кабельной бумаги и несплошным слоем обмотки и хлопчатобумажной пряжи;

ПБ—провод, изолированный несколькими слоями обмотки из кабельной бумаги;

ПЭВ-1 — проволока эмалированная, высокопрочная, однослойная;

ПЭВ-2 — то же, но двухслойная;

ПЭВП — проволока эмалированная, высокопрочная, прямоугольная;

ПЭЛШКО — провод медный изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем шелка капрон.

Нагревостойкие провода:

ПЭТСО — провод, покрытый эмалью ПЭВ-1, ПЭВ-2 и одним слоем стекловолокна на глифталевых лаках.

ПЭТКСО — то же, но на кремнийорганических лаках.

ПСД — провод с двухслойной обмоткой из стекловолокна на глифталевом лаке.

ПСДК — то же, но на кремнийорганических лаках.

ПДА — провод в дельта-асбестовой изоляции.

Примечание. 1. По требованию заказчика допускается, кроме того, изготовление проводов следующих марок:

ПШО — провод, изолированный одним слоем шелковой обмотки;

ПШД — провод, изолированный двумя слоями шелковой обмотки;

ПЭШД — провод, изолированный эмалью и двумя слоями шелковой обмотки.

2. Провода марок ПЭЛБД и ПБТ поставляются только для автотракторного электрооборудования.

Номинальные диаметры проволоки, идущей для изготовления изолированных обмоточных проводов, должны соответствовать значениям, указанным в табл. 1.

Номинальные размеры и расчетные сечения голых проводов прямоугольного сечения, идущих для изготовления обмоточных проводов, должны соответствовать значениям, указанным в табл. 2.

Номинальные размеры и расчетные сечения шин должны соответствовать значениям, указанным в табл. 3.

Номинальные размеры и расчетные сечения лент должны соответствовать значениям, указанным в табл. 4.

Максимальная толщина изоляции провода должна соответствовать значениям, указанным в табл. 7.

*Таблица 1*

**Круглая медь**

| Номинальные диаметры (в *мм*) | | | | Номинальные диаметры (в *мм*) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,05 | 0,31 | 0,83 | 1,81 | 0,16 | 0,57 | 1,25 | 3.53 |
| 0,06 | 0,33 | 0,86 | 1,88 | 0,17 | 0,59 | 1,30 | 3,8 |
| 0,07 | 0,35 | 0,90 | 1,95 | 0,18 | 0,62 | 1,35 | 4.1 |
| 0,08 | 0,38 | 0,93 | 2,02 | 0,19 | 0,64 | 1,40 | 4,5 |
| 0,09 | 0,41 | 0,96 | 2.10 | 0,20 | 0,67 | 1,45 | 4,8 |
| 0,10 | 0,44 | 1,00 | 2,26 | 0,21 | 0,69 | 1,50 | 5,2 |
| 0,11 | 0,47 | 1,04 | 2,44 | 0,23 | 0,72 | 1,56 | 5,5 |
| 0,12 | 0,49 | 1,08 | 2,63 | 0,25 | 0,74 | 1,62 | 6,0 |
| 0,13 | 0,51 | 1,12 | 2,83 | 0,27 | 0,77 | 1,68 | 6,5 |
| 0,14 | 0,53 | 1,16 | 3,05 | 0,29 | 0,80 | 1,74 | 7,0 |
| 0,15 | 0,55 | 1,20 | 3,28 | | | | |

*Таблица 2*

**Прямоугольная медь**

| b \ a | 0,90 | 1,00 | 1,08 | 1,16 | 1,25 | 1,35 | 1,45 | 1,56 | 1,68 | 1,81 | 1,95 | 2,1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2,10** | 1,82 | 1,89 | 2,06 | 2,23 | 2,42 | 2,63 | 2,84 | 3,07 | 3,32 | 3,59 | — | 3,92 |
| **2,26** | 1,96 | 2,05 | 2,23 | 2,41 | 2,62 | 2,84 | 3,07 | 3,32 | 3,59 | 3,83 | — | — |
| **2,44** | 2,13 | 2,23 | 2,43 | 2,62 | 2,84 | 3,08 | 3,33 | 3,60 | 3,89 | 4,21 | 4,55 | 4,64 |
| **2,63** | 2,30 | 2,42 | 2,63 | 2,84 | 3,08 | 3,34 | 3,60 | 3,80 | 4,21 | 4,55 | 4,92 | 5,04 |
| **2,83** | 2,48 | 2,62 | 2,85 | 3,07 | 3,33 | 3,61 | 3,89 | 4,20 | 4,54 | 4,91 | 5,31 | 5,46 |
| **3,05** | — | 2,84 | 3,08 | 3,33 | 3,60 | 3,91 | 4,21 | 4,55 | 4,91 | 5,31 | 5,74 | 5,93 |
| **3,28** | — | 3,07 | 3,33 | 3,60 | 3,89 | 4,22 | 4,55 | 4,91 | 5,30 | 5,73 | 6,19 | 6,41 |
| **3,53** | — | 3,32 | 3,60 | 3,89 | 4,20 | 4,56 | 4,91 | 5,30 | 5,72 | 6,18 | 6,67 | 6,93 |
| **3,8** | — | 3,59 | 3,89 | 4,20 | 4,54 | 4,92 | 5,30 | 5,72 | 6,17 | 6,67 | 7,20 | 7,50 |
| **4,1** | — | 3,89 | 4,22 | 4,55 | 4,92 | 5,33 | 5,74 | 6,19 | 6,68 | 7,21 | 7,79 | 8,13 |
| **4,4** | — | 4,19 | 4,54 | 4,89 | 5,29 | 5,73 | 6,17 | 6,65 | 7,18 | 7,75 | 8,37 | 8,76 |
| **4,7** | — | 4,49 | 4,87 | 5,24 | 5,67 | 6,14 | 6,61 | 7,12 | 7,79 | 8,30 | 8,96 | 9,39 |
| **5,1** | — | 4,89 | 5,30 | 5,71 | 6,17 | 6,68 | 7,19 | 7,75 | 8,36 | 9,02 | 9,74 | 10,2 |
| **5,5** | — | 5,29 | 5,73 | 6,17 | 6,67 | 7,22 | 7,77 | 8,37 | 9,03 | 9,75 | 10,5 | 11,1 |
| **5,9** | — | 5,69 | 6,16 | 6,63 | 7,17 | 7,76 | 8,35 | 8,99 | 9,70 | 10,5 | 11,3 | 11,9 |
| **6,4** | — | 6,19 | 6,70 | 7,21 | 7,79 | 8,43 | 9,07 | 9,77 | 10,0 | 11,4 | 12,3 | 12,9 |
| **6,9** | — | 6,69 | 7,24 | 7,79 | 8,42 | 9,11 | 9,79 | 10,6 | 11,4 | 12,3 | 13,3 | 14,0 |
| **7,4** | — | 7,19 | 7,78 | 8,37 | 9,04 | 9,78 | 10,5 | 11,3 | 12,6 | 13,3 | 14,2 | 15,0 |
| **8,0** | — | 7,79 | 8,43 | 9,07 | 9,79 | 10,6 | 11,4 | 12,3 | 13,2 | 14,4 | 15,4 | 16,3 |
| **8,6** | — | 8,39 | 9,08 | 9,77 | 10,6 | 11,4 | 12,3 | 13,2 | 14,2 | 15,5 | 16,6 | 17,6 |
| **9,3** | — | — | — | — | — | 12,4 | 13,3 | 14,3 | 15,4 | 16,6 | 17,9 | 19,0 |
| **10,0** | — | — | — | — | — | — | — | 15,4 | 16,6 | 17,9 | 19,3 | 20,5 |
| **10,8** | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 19,3 | 20,9 | 22,2 |
| **11,6** | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 23,9 |
| **12,5** | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 25,8 |
| **13,5** | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| **14,5** | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |

| b \ a | 2,26 | 2,44 | 2,63 | 2,83 | 3,05 | 3,28 | 3,53 | 3,8 | 4,1 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2,10** | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| **2,26** | 4,63 | — | 5,46 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| **2,44** | — | 5,37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| **2,63** | — | 5,94 | 6,44 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| **2,83** | 5,92 | 6,43 | — | 7,53 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| **3,05** | 6,41 | 6,96 | 7,54 | 8,15 | 8,72 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| **3,28** | 6,93 | 7,52 | 8,15 | 8,80 | — | 10,3 | — | — | — | — | — | — | — |
| **3,53** | 7,50 | 8,13 | 8,80 | 9,51 | 10,3 | 11,1 | 12,0 | — | — | — | — | — | — |
| **3,8** | 8,11 | 8,79 | 9,51 | 10,3 | 11,1 | 12,0 | — | 13,9 | — | — | — | — | — |
| **4,1** | 8,79 | 9,52 | 10,3 | 11,1 | 12,0 | 13,0 | 14,0 | 15,1 | 15,9 | — | — | — | — |
| **4,4** | 9,46 | 10,2 | 11,1 | 12,0 | 12,9 | 13,9 | 15,0 | 16,2 | 17,1 | 18,5 | — | — | — |
| **4,7** | 10,1 | 11,0 | 11,9 | 12,8 | 13,8 | 14,9 | 16,1 | 17,4 | 18,4 | — | — | — | — |
| **5,1** | 11,0 | 11,9 | 12,9 | 13,9 | 15,1 | 16,2 | 17,5 | 18,9 | 20,0 | 21,5 | — | 25,1 | — |
| **5,5** | 11,9 | 12,9 | 14,6 | 15,1 | 16,8 | 17,5 | 18,9 | 20,4 | 21,7 | 23,3 | 25,0 | 27,2 | — |
| **5,9** | 12,8 | 13,9 | 15,0 | 16,2 | 17,5 | 18,9 | 20,3 | 21,9 | 23,3 | 25,1 | 26,8 | 29,2 | — |
| **6,4** | 14,0 | 15,1 | 16,3 | 17,6 | 19,0 | 20,5 | 22,1 | 23,8 | 25,3 | 27,3 | 29,2 | 31,7 | 34,3 |
| **6,9** | 15,1 | 16,3 | 17,7 | 19,0 | 20,6 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | 27,4 | 29,5 | 31,5 | 34,3 | 37,1 |
| **7,4** | 16,2 | 17,6 | 19,0 | 20,4 | 22,1 | 23,6 | 25,6 | 27,6 | 29,4 | 31,7 | 33,9 | 36,8 | 39,8 |
| **8,0** | 17,6 | 19,0 | 20,5 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | 27,7 | 29,9 | 31,9 | 34,3 | 36,7 | 39,9 | 43,1 |
| **8,6** | 18,9 | 20,5 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | 27,7 | 29,9 | 32,2 | 34,4 | 36,9 | 39,5 | 43,0 | 46,4 |
| **9,3** | 20,5 | 22,2 | 24,0 | 25,8 | 27,9 | 30,0 | 32,3 | 34,8 | 37,2 | 40,0 | 42,8 | 46,5 | 50,3 |
| **10,0** | 22,1 | 23,9 | 25,8 | 27,8 | 30,0 | 32,3 | 34,8 | 37,5 | 40,1 | 43,1 | 46,1 | 50,1 | 54,1 |
| **10,8** | 23,9 | 25,9 | 27,9 | 30,1 | 32,4 | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,4 | 46,6 | 49,9 | 54,2 | 58,5 |
| **11,6** | 25,7 | 27,8 | 30,0 | 32,3 | 34,9 | 37,5 | 40,5 | 43,6 | 46,7 | 50,1 | 53,6 | 58,3 | 62,9 |
| **12,5** | 27,8 | 30,0 | 32,4 | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,6 | 47,0 | 50,4 | 54,1 | 57,9 | 62,9 | 67,9 |
| **13,5** | — | 32,4 | 35,0 | 37,7 | 40,7 | 43,8 | 47,2 | 50,8 | 54,5 | 58,5 | 62,6 | 68,0 | 73,4 |
| **14,5** | — | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,7 | 47,1 | 50,6 | 54,6 | 58,6 | 62,9 | 67,3 | 74,1 | 78,9 |

**Прямоугольная медь**

| b \ a | 1,00 | 1,08 | 1,16 | 1,25 | 1,35 | 1,45 | 1,56 | 1,68 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,9 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6,4 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6,9 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 7,4 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,0 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,6 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 9,3 | 9,1 | 9,8 | 10,6 | 11,4 | — | — | — | — |
| 10,0 | 9,8 | 10,6 | 11,4 | 12,3 | 13,3 | 14,3 | — | — |
| 10,8 | 10,6 | 11,5 | 12,3 | 13,3 | 14,4 | 15,5 | 16,6 | 17,9 |
| 11,6 | 11,4 | 12,3 | 13,3 | 14,3 | 15,5 | 16,6 | 17,9 | 19,3 |
| 12,5 | 12,3 | 13,3 | 14,3 | 15,4 | 16,7 | 17,9 | 19,4 | 20,8 |
| 13,5 | 13,3 | 14,4 | 15,5 | 16,7 | 18,0 | 19,4 | 20,8 | 22,5 |
| 14,5 | 14,3 | 15,5 | 16,6 | 17,9 | 19,4 | 20,8 | 22,4 | 24,2 |
| 15,6 | 15,4 | 16,6 | 17,9 | 19,3 | 20,9 | 22,4 | 24,1 | 26,0 |
| 16,8 | 16,6 | 17,9 | 19,3 | 20,8 | 22,5 | 24,2 | 26,0 | 28,0 |
| 18,0 | 17,8 | 19,2 | 20,7 | 22,3 | 24,1 | 25,9 | 27,9 | 30,0 |
| 19,5 | 19,3 | 20,9 | 22,4 | 24,2 | 26,1 | 28,1 | 30,2 | 32,6 |
| 22,0 | 21,8 | 23,6 | 25,3 | 27,3 | 29,5 | 31,7 | 34,1 | 36,8 |
| 25,0 | 24,8 | 26,8 | 28,8 | 31,1 | 33,6 | 36,1 | 38,8 | 41,8 |
| 26,3 | 26,1 | 28,2 | 30,3 | 32,7 | 35,3 | 37,9 | 40,8 | 44,0 |
| 28 | 27,8 | 30,2 | 32,3 | 34,8 | 37,6 | 40,4 | 43,5 | 46,8 |
| 30 | 29,8 | 32,2 | 34,6 | 37,3 | 40,3 | 43,3 | 46,6 | 50,2 |
| 32 | 31,8 | 34,4 | 36,9 | 39,8 | 43,0 | 46,2 | 49,7 | 53,6 |
| 35 | 34,8 | 37,6 | 40,4 | 43,6 | 47,1 | 50,6 | 54,4 | 58,6 |
| 40 | 39,8 | 43,0 | 46,2 | 49,8 | 53,8 | 57,8 | 62,2 | 67,0 |
| 45 | 44,8 | — | — | 56,1 | 60,6 | 65,1 | 70,0 | 75,4 |
| 50 | 49,8 | 53,8 | 57,8 | 62,3 | 67,3 | 72,3 | 77,8 | 83,8 |
| 55 | 54,8 | — | — | — | — | — | 85,6 | 92,5 |
| 60 | 59,8 | 64,6 | 69,4 | 74,8 | 80,8 | 86,8 | 93,4 | 100,8 |
| 65 | 64,8 | — | — | — | — | — | 101,2 | — |
| 70 | 69,8 | — | — | — | — | — | 109,0 | — |
| 75 | 74,8 | — | — | — | — | — | — | — |
| 80 | 79,8 | — | — | — | — | — | 124,6 | — |
| 90 | — | — | — | — | — | — | 140,2 | — |
| 100 | 99,8 | — | — | — | — | — | 155,8 | — |
| 120 | 119,8 | — | — | — | — | — | — | |



| b \ a | 1,81 | 1,95 | 2,1 | 2,26 | 2,44 | 2,63 | 2,83 | 3,05 | 3,28 | 3,53 | 3,8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 7,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 9,3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 11,6 | 20,8 | 22,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12,5 | 22,4 | 24,2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 13,5 | 24,2 | 26,1 | 27,9 | 30,0 | — | — | — | — | — | — | — |
| 14,5 | 26,1 | 28,0 | 30,0 | 32,3 | — | — | — | — | — | — | — |
| 15,6 | 28,0 | 30,2 | 32,3 | 34,8 | 37,6 | 40,5 | 43,7 | 47,1 | 50,7 | 54,6 | 58,8 |
| 16,8 | 30,2 | 32,6 | 34,8 | 37,5 | 40,5 | 43,7 | 47,0 | 50,7 | 54,6 | 58,8 | 63,3 |
| 18,0 | 32,4 | 34,9 | 37,3 | 40,2 | 43,4 | 46,8 | 50,4 | 54,4 | 58,5 | 63,0 | 67,9 |
| 19,5 | 35,1 | 37,8 | 40,5 | 43,6 | 47,1 | 50,8 | 54,7 | 59,0 | 63,5 | 68,3 | 73,6 |
| 22,0 | 39,6 | 42,7 | 45,7 | 49,2 | 53,2 | 57,4 | 61,8 | 66,6 | 71,7 | 77,2 | 83,1 |
| 25,0 | 45,1 | 48,6 | 52,0 | 56,0 | 60,5 | 65,3 | 70,3 | 75,8 | 81,5 | 88,3 | 94,5 |
| 26,3 | 47,4 | 51,1 | 54,7 | 58,9 | 63,7 | 68,7 | 73,9 | 79,7 | 85,8 | 92,3 | 99,4 |
| 28 | 50,5 | 54,4 | 58,3 | 62,8 | 67,8 | 73,1 | 78,7 | 84,9 | 91,3 | 98,3 | 105,9 |
| 30 | 54,1 | 58,3 | 62,5 | 67,3 | 72,7 | 78,4 | 84,4 | 91,9 | 97,9 | 105,4 | 113,5 |
| 32 | 57,7 | 62,2 | 66,7 | 71,8 | 77,6 | 83,7 | 90,1 | 97,1 | 104,5 | 112,5 | 121,1 |
| 35 | 63,2 | 68,1 | 73,0 | 78,6 | 84,9 | 91,6 | 98,6 | 104,5 | 114,3 | 123,1 | 132,5 |
| 40 | 72,2 | 77,8 | 83,5 | 89,9 | 97,1 | 104,7 | 112,7 | 119,5 | 130,7 | 140,7 | 151,5 |
| 45 | 81,3 | 87,6 | 94,0 | 101,2 | 109,3 | 117,9 | 126,9 | 134,5 | 147,1 | 158,4 | 170,5 |
| 50 | 90,3 | 97,3 | 104,5 | 112,5 | 121,5 | 131,0 | 141,0 | 149,5 | 163,5 | 176,0 | 189,5 |
| 55 | 99,4 | 107,1 | 115,0 | 123,8 | 133,7 | 144,2 | 155,2 | 164,5 | 179,9 | 193,7 | 208,5 |
| 60 | 108,4 | 116,8 | 125,5 | 135,1 | 145,9 | 157,3 | 169,3 | 179,5 | 196,3 | 211,3 | 227,5 |
| 65 | — | 126,6 | — | — | 158,1 | 170,5 | 183,5 | 194,5 | 212,7 | 229,0 | 246,5 |
| 70 | — | 136,3 | — | — | 170,3 | — | — | 209,5 | 229,1 | 246,6 | 265,5 |
| 75 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 80 | — | 156,8 | — | — | 194,7 | — | — | 239,5 | — | — | — |
| 90 | — | 175,3 | — | — | 219,1 | — | — | 269,5 | — | — | — |
| 100 | — | 194,8 | — | — | 243,5 | — | — | 299,5 | — | — | — |
| 120 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

| b \ a | 4,1 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,9 | — | — | — | — | — | 34,5 | — | — |
| 6,4 | — | — | — | — | — | 37,5 | — | — |
| 6,9 | — | — | — | — | — | 40,5 | — | 47,4 |
| 7,4 | — | — | — | — | — | 43,5 | 47,2 | 50,9 |
| 8,0 | — | — | — | — | — | 47,1 | 51,1 | 55,1 |
| 8,6 | — | — | — | — | — | 50,7 | 55,0 | 59,3 |
| 9,3 | — | — | — | — | — | 54,9 | 59,6 | 64,2 |
| 10,0 | — | — | — | — | — | 59,1 | 64,1 | 69,1 |
| 10,8 | — | — | — | — | — | 63,9 | 69,3 | 74,7 |
| 11,6 | — | — | — | — | — | 68,7 | 75,5 | 80,4 |
| 12,5 | — | — | — | — | — | 74,1 | 80,4 | 86,6 |
| 13,5 | — | — | — | — | — | 80,1 | 86,9 | 93,6 |
| 14,5 | — | — | — | — | — | 86,1 | 93,4 | 100,6 |
| 15,6 | 63,1 | 67,6 | 72,4 | 78,7 | 84,9 | 92,7 | 100,5 | 108,3 |
| 16,8 | 68,0 | 73,0 | 78,1 | 84,8 | 91,5 | 99,9 | 108,3 | 116,7 |
| 18,0 | 72,9 | 78,3 | 83,7 | 90,9 | 98,1 | 107,1 | 116,1 | 125,1 |
| 19,5 | 79,1 | 84,3 | 90,8 | 98,6 | 106,4 | 116,1 | 126,9 | 135,6 |
| 22,0 | 89,3 | 95,8 | 102,5 | 111,3 | 120,1 | 131,1 | 142,1 | 153,1 |
| 25,0 | 101,6 | 109,1 | 116,5 | 126,6 | 136,6 | 149,1 | 161,6 | 174,1 |
| 26,3 | 106,9 | 114,3 | 122,7 | 133,2 | 143,8 | 156,9 | 170,1 | 183,2 |
| 28 | 113,9 | 122,3 | 130,7 | 141,9 | 153,1 | 167,1 | 181,1 | 195,1 |
| 30 | 122,1 | 131,1 | 140,1 | 152,1 | 164,1 | 179,1 | 194,1 | 209,1 |
| 32 | 130,3 | 139,9 | 149,5 | 162,3 | 175,1 | 191,1 | 207,1 | — |
| 35 | 139,1 | 153,1 | 163,6 | 174,1 | 191,6 | 209,1 | — | — |
| 40 | 159,1 | 175,1 | 187,1 | 199,1 | 219,1 | 239,1 | 259,1 | 279,1 |
| 45 | 179,1 | 197,1 | — | 224,1 | 246,5 | 269,1 | 291,6 | 314,1 |
| 50 | 199,1 | 219,1 | — | 249,1 | 274,1 | 299,1 | 324,1 | 349,1 |
| 55 | 219,1 | 241,1 | — | 274,1 | 301,6 | 329,1 | 356,6 | 384,1 |
| 60 | 239,1 | 263,5 | — | 299,1 | 329,1 | 359,1 | 389,1 | 419,1 |
| 65 | 259,1 | 285,5 | — | 324,1 | — | 389,1 | — | 454,1 |
| 70 | 279,1 | 307,5 | — | 349,1 | — | — | — | — |
| 75 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 80 | 319,1 | — | — | 399,1 | — | 479,1 | — | 559,1 |
| 90 | 359,1 | — | — | 449,1 | — | 539,1 | — | 629,1 |
| 100 | 399,1 | — | — | 499,1 | — | 599,1 | — | 699,0 |
| 120 | — | — | — | — | — | — | — | — |





| b \ a | 8,0 | 9,0 | 10,0 | 11,0 | 12,5 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 7,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,0 | 63,1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,6 | 68,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 9,3 | 73,5 | 82,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10,0 | 79,1 | 89,1 | 99,1 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10,8 | 85,5 | 96,3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 11,6 | 91,9 | 103,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12,5 | 99,1 | 111,6 | 124,1 | 136,6 | 155,1 | — | — | — | — | — | — |
| 13,5 | 107,1 | 120,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 14,5 | 115,1 | 129,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 15,6 | 123,9 | 139,5 | 159,1 | 175,1 | 199,1 | 223,1 | 255,1 | — | — | — | — |
| 16,8 | 133,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 18,0 | 143,1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 19,5 | 155,1 | 174,6 | 199,1 | 219,1 | 249,1 | 279,1 | 319,1 | 359,1 | 399,1 | — | — |
| 22,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 25,0 | 199,1 | 224,1 | 249,1 | 274,1 | 311,6 | 349,1 | 399,1 | 449,1 | 499,1 | 624,1 | — |
| 26,3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 28 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 30 | 239,1 | 269,1 | 299,1 | 329,1 | 374,1 | 419,1 | 479,1 | 539,1 | 599,1 | 749,1 | 899,1 |
| 32 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 35 | 279,1 | — | 349,1 | — | 436,1 | — | — | — | 699,1 | — | — |
| 40 | 319,1 | 359,1 | 399,1 | 439,1 | 499,1 | 559,1 | 639,1 | 719,1 | 799,1 | 999,1 | 1199,0 |
| 45 | 359,1 | 404,1 | 449,1 | 494,1 | 561,6 | 629,1 | 719,1 | 809,1 | 899,1 | — | 1349,0 |
| 50 | 399,1 | 449,1 | 499,1 | 549,1 | 624,1 | 699,1 | 799,1 | 899,1 | 999,1 | — | — |
| 55 | 439,1 | 494,1 | 549,1 | — | 686,6 | — | 879,1 | — | 1099,0 | — | — |
| 60 | 479,1 | 539,1 | 599,1 | — | 749,1 | — | 959,1 | — | 1199,0 | — | — |
| 65 | — | 584,1 | 649,1 | — | 813,6 | — | 1039,0 | — | — | — | — |
| 70 | 559,1 | 629,1 | 699,1 | — | 874,1 | — | 1119,0 | — | — | — | — |
| 75 | 599,1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 80 | 639,1 | — | 799,1 | — | 999,1 | — | — | — | — | — | — |
| 90 | 719,1 | — | 899,1 | — | 1124,0 | — | — | — | — | — | — |
| 100 | 799,0 | — | 999,0 | — | 1249,0 | — | — | — | — | — | — |
| 120 | 959,0 | — | 1199,0 | — | — | — | — | — | — | — | — |

Примечания: 1. Расчетные сечения даны с учетом закруглений углов поперечных сечений.
2. Размеры *a* по толщине 3,05; 4,1 5,1 для ширины от 35,0 *мм* и выше округляются до размеров 3,0; 4,0 и 5,0 *мм*.
Размеры *b* по ширине 15,6 и 19,5 для толщины от 10 *мм* и выше округляются до размеров 16 и 20 *мм*.

*Таблица 4*

**Прямоугольная медь**

| b \ a | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,1 | — | — | — | — | — | — | 2,55 | 3,06 | 3,57 | 4,08 | 4,59 |
| 5,5 | — | — | — | — | — | — | 2,75 | 3,30 | 3,85 | 4,40 | 4,95 |
| 5,9 | — | — | — | — | — | — | 2,95 | 3,54 | 4,13 | 4,72 | 5,31 |
| 6,4 | — | — | — | — | — | — | 3,20 | 3,84 | 4,48 | 5,12 | 5,76 |
| 6,9 | — | — | — | — | — | — | 3,45 | 4,14 | 4,83 | 5,52 | 6,21 |
| 7,4 | — | — | — | — | — | — | 3,7 | 4,44 | 5,18 | 5,92 | 6,66 |
| 8,0 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 | 5,6 | 6,4 | 7,2 |
| 8,6 | — | — | — | — | — | — | 4,30 | 5,16 | 6,02 | 6,88 | 7,74 |
| 9,3 | — | — | — | — | — | — | 4,65 | 5,58 | 6,51 | 7,44 | 8,37 |
| 10,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 |
| 10,8 | — | — | — | — | — | — | 5,4 | 6,48 | 7,56 | 8,64 | 9,72 |
| 11,6 | — | — | — | — | — | — | 5,8 | 6,96 | 8,12 | 9,28 | 10,4 |
| 12,5 | 1,25 | 1,88 | 2,5 | 3,13 | 3,75 | 5,0 | 6,25 | 7,5 | 8,75 | 10,0 | 11,3 |
| 13,5 | — | — | — | — | — | — | 6,75 | 8,1 | 9,45 | 10,8 | 12,2 |
| 14,0 | 1,4 | 2,1 | 2,8 | 3,5 | 4,2 | 5,6 | 7,0 | 8,4 | 9,8 | 11,2 | 12,6 |
| 16,0 | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 | 6,4 | 8,0 | 9,6 | 11,2 | 12,8 | 14,4 |
| 16,8 | — | — | — | — | — | — | 8,4 | 10,1 | 11,8 | 13,4 | 15,1 |
| 18,0 | 1,8 | 2,7 | 3,6 | 4,5 | 5,4 | 7,2 | 9,0 | 10,8 | 12,6 | 14,4 | 16,2 |
| 20,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 16,0 | 18,0 |
| 22,0 | 2,2 | 3,3 | 4,4 | 5,5 | 6,6 | 8,8 | 11,0 | 13,2 | 15,4 | 17,6 | 19,8 |
| 25,0 | 2,5 | 3,75 | 5,0 | 6,25 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,0 | 22,5 |
| 26,3 | — | — | — | — | — | — | 13,2 | 15,8 | 18,4 | 21,0 | 23,7 |
| 28 | 2,8 | 4,2 | 5,6 | 7,0 | 8,4 | 11,2 | 14,0 | 16,8 | 19,6 | 22,4 | 25,2 |
| 30 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 7,5 | 9,0 | 12,0 | 15,0 | 18,0 | 21,0 | 24,0 | 27,0 |
| 32 | 3,2 | 4,8 | 6,4 | 8,0 | 9,6 | 12,8 | 16,0 | 19,2 | 22,4 | 25,6 | 28,8 |
| 35 | 3,5 | 5,25 | — | — | 10,5 | — | 17,5 | — | 24,5 | 28,0 | — |
| 40 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 16,0 | 20,0 | 24,0 | 28,0 | 32,0 | 36,0 |
| 45 | — | 6,75 | — | — | 13,5 | — | 22,5 | — | 31,5 | 36,0 | — |
| 50 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 20,0 | 25,0 | 30,0 | 35,0 | 40,0 | 45,0 |
| 55 | — | — | — | — | 16,5 | — | 27,5 | — | 38,5 | 44,0 | — |
| 60 | 6,0 | 9,0 | 12,0 | 15,0 | 18,0 | 24,0 | 30,0 | 36,0 | 42,0 | 48,0 | 54,0 |
| 65 | — | — | — | — | — | — | — | — | 45,5 | — | — |
| 70 | — | — | 14,0 | — | 21,0 | 28,0 | 35,0 | 42,0 | — | 56,0 | 63,0 |
| 75 | — | — | — | — | 22,5 | 30,0 | 37,5 | 45,0 | 52,5 | 60,0 | 67,5 |
| 80 | — | — | 16,0 | — | 24,0 | 32,0 | 40,0 | 48,0 | — | 64,0 | 72,0 |
| 90 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 72,0 | — |
| 100 | — | — | 20,0 | — | — | — | 50,0 | — | — | 80,0 | — |
| 120 | — | — | — | — | — | — | 60,0 | — | — | — | — |



*Таблица 5*

**Размеры (в *мм*) и сечения круглого медного провода (в *мм*²), применяемого в трансформаторах (марки ПЭБО и ПБ)**

| d | q | Изоляция (в *мм*) | d | q | Изоляция (в *мм*) | d | q | Изоляция (в *мм*) | d | q | Изоляция (в *мм*) | d | q | Изоляция (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,15 | 0,0177 | | 0,55 | 0,238 | | 1,00 | 0,785 | | 1,50 | 1,77 | | 2,26 | 4,01 | |
| 0,20 | 0,0314 | 0,125 | 0,59 | 0,273 | | 1,08 | 0,916 | 0,21 | 1,56 | 1,91 | | 2,44 | 4,68 | |
| 0,29 | 0,0661 | 0,135 | 0,64 | 0,322 | 0,17 | 1,12 | 0,985 | | 1,68 | 2,22 | | 2,63 | 5,43 | 0,30 |
| 0,31 | 0,0755 | | 0,69 | 0,374 | | 1,16 | 1,06 | | 1,74 | 2,38 | 0,30 | 2,83 | 6,29 | |
| 0,35 | 0,0962 | 0,16 | 0,74 | 0,43 | | 1,25 | 1,23 | | 1,81 | 2,57 | | 3,05 | 7,31 | |
| 0,38 | 0,1134 | | 0,80 | 0,503 | 0,18 | 1,30 | 1,33 | 0,30 | 1,88 | 2,78 | | 3,28 | 8,45 | |
| 0,41 | 0,132 | 0,165 | 0,86 | 0,581 | | 1,35 | 1,43 | | 1,95 | 2,99 | | 3,53 | 9,79 | |
| 0,51 | 0,204 | 0,17 | 0,93 | 0,679 | | 1,45 | 1,65 | | 2,10 | 2,46 | | | | |

Примечания: 1. Толщина изоляции указана на две стороны.
2. Расчетная толщина изоляции на 0,1 *мм* больше указанной в табл. 5 с учетом плотности укладки.
3. При $d = 0{,}15$—1,16 *мм* — нормально провод эмалированный с хлопчатобумажной обмоткой (ПЭБО); при $d = 1{,}25 — 3{,}53$ *мм* — нормально провод изолированный бумагой (ПБ).

*Таблица 5а*

**Увеличение веса круглого медного провода за счет изоляции**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Диаметр провода (в *мм*)<br>Процент увеличения веса | 0,15<br>22 | 0,2—0,29<br>15 | 0,31<br>14 | 0,35<br>12 | 0,38—0,41<br>11 |
| Диаметр провода (в *мм*)<br>Процент увеличения веса | 0,51<br>9 | 0,55<br>8 | 0,59—0,64<br>7 | 0,69—0,8<br>6 | 0,85—1,16<br>5 |
| Диаметр провода (в *мм*)<br>Процент увеличения веса | 1,25—1,81<br>4 | 1,88—2,63<br>3 | 2,83—4,1<br>2 | — | — |

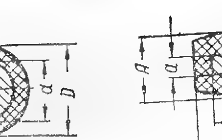
*Таблица 6*

**Размеры и сечения прямоугольного медного провода, применяемого в трансформаторах (ПББО)**

| b \ a | 1,35 | 1,56 | 1,68 | 1,81 | 2,1 | 2,26 | 2,44 | 2,63 | 2,83 | 3,05 | 3,28 | 3,53 | 3,8 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3,8 | — | 5,72 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 4,4 | 5,73 | 6,65 | — | 7,75 | 8,76 | — | 10,2 | — | 12 | — | 13,9 | — | 15,1 | — | — | — | — |
| 5,1 | 6,68 | 7,75 | 8,36 | 9,02 | 10,2 | — | 11,9 | — | 13,9 | — | 16,2 | — | 18,9 | 21,5 | — | — | — |
| 5,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | 15,1 | — | — | — | 20,4 | — | — | — | — |
| 5,9 | 5,76 | 8,99 | 9,7 | 10,5 | 11,9 | — | 13,9 | — | 16,2 | — | 18,9 | — | 21,9 | — | — | 29,2 | — |
| 6,4 | — | 9,77 | — | 11,4 | 12,9 | — | 15,1 | — | 17,6 | 19,0 | 20,5 | — | 23,8 | 27,3 | — | 31,7 | — |
| 6,9 | — | 10,6 | 11,4 | 12,3 | 14,0 | — | 16,3 | — | 19,0 | — | 22,1 | — | 25,7 | 29,5 | — | 34,3 | — |
| 7,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | 20,4 | 22,1 | — | — | — | — | — | — | — |
| 8,0 | — | 12,3 | 13,2 | 14,4 | 16,3 | 17,6 | 19,0 | 20,5 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | — | 29,9 | 34,3 | — | 39,9 | 43,1 |
| 8,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 39,5 | — | — |
| 9,3 | — | 14,3 | — | 16,6 | 19,0 | — | 22,2 | 24,0 | 25,8 | 27,9 | 30,0 | — | 34,8 | 40,0 | — | 46,5 | — |
| 10,0 | — | — | — | — | — | — | 23,9 | 25,8 | — | — | 32,3 | — | 37,5 | 43,1 | — | 50,1 | 54,1 |
| 10,8 | — | — | — | 19,3 | 22,2 | — | 25,9 | — | 30,1 | — | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 46,6 | — | 54,2 | 58,5 |
| 11,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 43,6 | — | — | 58,3 | — |
| 12,5 | — | — | — | — | 25,8 | — | 30,0 | — | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,6 | 47,0 | — | — | 62,9 | — |

П р и м е ч а н и я: 1. Изоляция на две стороны нормальная 0,45 (0,55), усиленная 0,95, (1,0), 1,35 (1,4), 1,95 (2,0).
2. В расчетной записке указывается номинальный размер изоляции, этот же размер учитывается в тепловом расчете.
3. Размеры катушки считают по толщине изоляции, указанной в скобках.
4. Провод изолирован кабельной бумагой с несплошной обмоткой хлопчатобумажной пряжей.
5. Прочеркнутые размеры не рекомендованы.
6. Увеличение веса прямоугольного медного провода за счет изоляции (для заказа) необходимо увеличивать на 5% для проводов до 1,35 × 5,9, на 4% для проводов 1,56 × 3,8 — 2,1 × 12,5 и на 3% для проводов 2,26 × 8,0 — 5,5 × 12,5 *мм.*

*Таблица 7*




**Толщина изоляции обмоточных проводов**

*D* — диаметр проволоки в обмотке
*d* — диаметр проволоки

*B* — большая сторона сечения проволоки вместе с обмоткой
*b* — большая сторона сечения проволоки

| Марка | Круглая проволока. Диаметр проволоки (в *мм*) | | | | | | | | | | | Прямоугольная проволока. Меньшая сторона сечения (в *мм*) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,05÷0,09 | 0,10÷0,19 | 0,20÷0,25 | 0,27÷0,29 | 0,31÷0,38 | 0,41÷0,49 | 0,51÷0,69 | 0,72÷0,96 | 1,00÷1,45 | 1,50÷2,10 | 2,26÷5,20 | 0,9÷1,95 | 2,1÷3,8 | 4,1÷5,5 |
| ПЭШО | 0,07 | 0,075 | 0,09 | 0,10 | 0,105 | 0,110 | 0,115 | 0,125 | 0,135 | — | — | — | — | — |
| ПЭЛШО | 0,07 | 0,075 | 0,09 | 0,10 | 0,105 | 0,110 | 0,115 | 0,125 | 0,135 | — | — | — | — | — |
| ПБО | — | — | 0,10 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | — | 0,14 | 0,175 | 0,23 |
| ПБД | — | — | 0,19 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,27 | 0,27 | 0,33 | 0,27 | 0,33 | 0,44 |
| ПБТ | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,38 | — | — | — | — |
| ПЭБО | — | — | 0,125 | 0,155 | 0,16 | 0,165 | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,21 | — | — | — | — |
| ПЭЛБО | — | — | 0,125 | 0,155 | 0,16 | 0,165 | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,21 | — | — | — | — |
| ПЭЛБД | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,33 | — | — | — | — | — |
| ПБОО | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| ПЭВ-1 | 0,025 | 0,025—0,03 | 0,03—0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04—0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07—0,08 | — | — | — | — | — |

| Марка | Круглая проволока. Диаметр проволоки (в *мм*): 0,05÷0,09 | 0,10÷0,19 | 0,20÷0,25 | 0,27÷0,29 | 0,31÷0,38 | 0,41÷0,49 | 0,51÷0,69 | 0,72÷0,96 | 1,00÷1,45 | 1,50÷2,10 | 2,26÷5,20 | Прямоугольная проволока. Меньшая сторона сечения (в *мм*): 0,9÷1,95 | 2,1÷3,8 | 4,1÷5,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ПЭВ-2 | 0,03 | 0,03—0,04 | 0,045 | 0,06 | 0,06 | 0,06—0,07 | 0,07—0,08 | 0,09 | 0,1—0,11 | 0,11—0,13 | — | — | — | — |
| ПЭВП | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,1 | 0,1 | — |
| ПЭТСО | — | — | — | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,22 | 0,22 | 0,24 | — | — | — | — |
| ПЭТКСО | — | — | — | — | — | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,2 | 0,2 | — | — | — | — |
| ПСД, ПСДК | — | — | — | — | 0,23 | 0,23 | 0,25 | 0,25 | 0,27 | 0,27 | 0,33 | 0,27 | 0,33 | 0,4 |
| ПДА | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,3 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |

Примечания: 1. Провод марки ПЭЛБД изготовляется только с диаметром проволоки 1,16 и 1,3 *мм*. Провод марки ПБТ изготовляется только с диаметром проволоки 1,81 *мм*.

2. Провод марки ПЭЛБО, предназначенный для автотракторного электрооборудования и изготовляемый из проволоки диаметром 1,16 *мм*, должен иметь диаметр по изоляции не более 1,36 *мм*.

3. Вследствие выпучивания изоляции толщина *A—a* больше толщины *B—b*. Разница в толщине между *A—a* и *B—b* трудно поддается учету, поэтому толщина *A—a* принимается равной толщине *B—b*, причем увеличение толщины *A—a* против значений, указанных в табл. 5, не является браковочным признаком.

4. Допускается увеличение максимальной толщины изоляции с тем, однако, чтобы размеры изолированных проводов не превышали номинальных с учтенными допускаемыми отклонениями.

5. Провода марок ПЭШО и ПЭЛШО диаметром до 0,20 *мм* по меди, употребляемые для шаблонной намотки секций, [illegible] по дополнительным к стандарту техническим условиям.



**Общая характеристика классов изоляции (по рекомендации международной электротехнической комиссии)**

Класс *Y* — хлопчатобумажное волокно, шелк, электрокартон, древесина и др., непропитанная.
($\theta^{\circ}_{доп} = 90^{\circ}$ С)

Класс *A* — хлопчатобумажное волокно, шелк, электрокартон, древесина, пропитанные (лаки на основе природных смол и масел). Лакоткани и лакобумаги, эмали на основе полиамидных смол.
($\theta^{\circ}_{доп} = 105^{\circ}$ С)

Класс *E* — дополнительный перечень к кл. *A*: эмали на основе эпоксидных смол, поливинилформаля, полиуретана. Пропитка: битумномасляные лаки, синтетические лаки, эпоксидные смолы и т. п.
($\theta^{\circ}_{доп} = 120^{\circ}$ С)

Класс *B* — стекловолокно, асбест, стеклоткань, миканит. Пропитка: битумы, синтетические смолы, эпоксидные смолы.
($\theta^{\circ}_{доп} = 130^{\circ}$)

Класс *F* — дополнительный перечень к кл. *B*: стекловолокно, асбест, стеклоткань, миканит. Пропитка: эпоксидные и другие смолы с повышенной теплостойкостью, алкиднокремнийорганические.
($\theta^{\circ}_{доп} = 155^{\circ}$ С)

Класс *H* — стекловолокно, асбест, стеклоткань, миканит, кремнийорганический каучук. Пропитка — кремнийорганические смолы.
($\theta^{\circ}_{доп} = 180^{\circ}$ С)

Класс *C* — слюда, фарфор и другие керамические материалы, стекло. Пропитка: неорганические связывающие вещества. Дополнительный перечень: пропитанная стеклоткань, пропитанный асбест, миканиты. Пропитка: кремнийорганические смолы с повышенной нагревостойкостью (до 225° С).
($\theta^{\circ}_{доп}$ свыше 180° С)

*Приложение IV*

## ИЗОЛЯЦИЯ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Таблица 1*

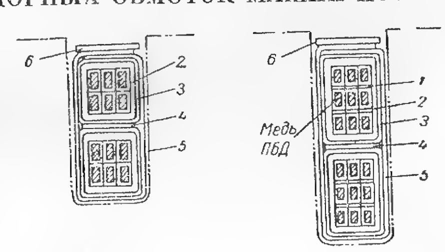



Рис. 1. Рис. 2.

**Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока нормального исполнения до 500 *в* (Изоляция класса А — медь ПБД)**

| № позиций (см. рис.) | Наименование материалов и допуски | Толщина материала (в *мм*) | Число слоев | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*): По высоте, Рис. 1 | По высоте, Рис. 2 | По ширине |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Пазовая часть (рис. 1, 2)** | | | | | |
| *1* | Картон ЭВТ — прокладка между проводниками . . . . . . . | 0,2 | 1 | — | 0,2 умноженное на количество прокладок | — |

| № позиций (см. рис.) | Наименование материалов и допуски | Толщина материала (в *мм*) | Число слоев | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | По высоте | | По ширине |
| | | | | Рис. 1 | Рис. 2 | |
| | Пропитка . . . . . . . | — | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Опрессовка группы проводников . . . . . . | — | — | Опрессовка | | |
| 2 | Микафолий вокруг каждой стороны катушки (перекрой сбоку) . | 0,15 | 2¼ | 0,6 | 0,6 | 0,75 |
| 3 | Фенальденовая бумага вокруг каждой стороны катушки (перекрой сбоку) . . . . | 0,07 | 2¼ | 0,28 | 0,28 | 0,35 |
| | Опрессовка сторон катушки . . . . . . . | — | — | Опрессовка | | |
| | Всего на каждую сторону катушки . . . | — | — | 1,1 | 1,1 без позиции *1* | 1,3 |
| 4 | Картон ЭВТ — прокладка между верхним и нижним слоями . . . | 0,3 | — | 0,3 | 0,3 | — |
| 5 | Картон ЭВТ — выкладка паза (перекрой сверху) . . . . . . . | 0,2 | 1¼ | 0,6 | 0,6 | 0,4 |
| 6 | Картон ЭВТ — прокладка под бандаж . . . | 0,5 | — | 0,5 | 0,5 | — |
| | Зазор на укладку . . | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Суммарный размер изоляции в пазу . . . . | — | — | 3,8 | 3,8 без позиции *1* | 1,9 |





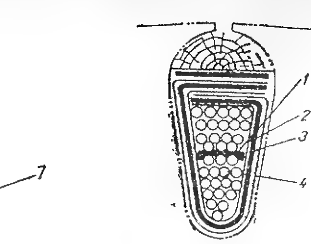


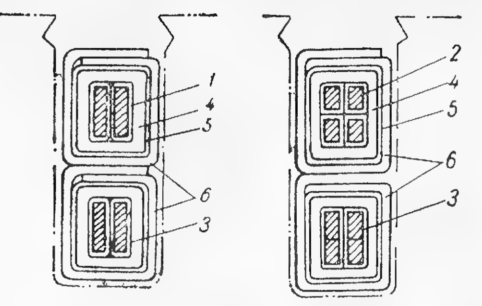

Рис. 3. Рис. 4.

| № позиций (см. рис.) | Наименование материалов и допуски | Толщина материала (в *мм*) | Число слоев | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | По высоте | | По ширине |
| | | | | Рис. 1 | Рис. 2 | |
| | **Лобовая часть (рис. 3)** | | | | | |
| | Пропитка . . . . . . | — | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 7 | Миткалевая лента вполнахлеста . . . . . . | 0,15 | 1 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| | Припуск . . . . . . . | — | — | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | Всего на катушку . . | — | — | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

Пазовая часть (рис. 4)

| № позиций | Наименование материалов и допуски | Толщина материала (в *мм*) | Число слоев | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | По высоте | По ширине |
| *1* | Картон ЭВТ — прокладка между катушками . . . | 0,5 | — | 0,5 | — |
| *2* | Картон ЭВТ — проходная коробочка . . . . . . . | 0,2 | 1¼ | 0,6 | 0,4 |
| *3* | Эксцельсиор [1] . . . . . . | 0,2 | 1¼ | 0,6 | 0,4 |
| *4* | Картон ЭВТ — выкладка паза . . . . . . . . . . | 0,2 | 1¼ | 0,6 | 0,4 |
| | Суммарный размер изоляции в пазу . . . . . . | — | — | 2,3 | 1,2 |

[1] Число прокладок позиции *1* равно числу витков в секции по высоте без одного.



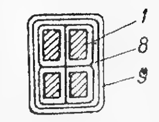




Рис. 5. Рис. 6. Рис. 7.

*Таблица 2*

**Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока нормального исполнения**

(Изоляция класса В—микалентная)

| № позиции (см. рис.) | Наименование материалов и допуски | Для напряжения до 500 в: Толщина материала, (в мм) | Число слоев | Двусторонняя толщина изоляции (в мм) по высоте: Рис. 5 | Рис. 6 | по ширине. Число секционных сторон в одном слое паза: 1 | 2 | 3 | 4 | Для напряжения от 500 до 1000 в: Толщина материала (в мм) | Число слоев | Двусторонняя толщина изоляции (в мм) по высоте: Рис. 5 | Рис. 6 | по ширине. Число секционных сторон в одном слое паза: 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Пазовая часть (рис. 5 и 6)** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Микалента на каждом проводнике в верхнем слое паза | | | 0,5 | — | | | | | | | 0,5 | — | | | | |
| 2 | Микалента на каждой части подразделенного проводника в верхнем слое паза | 0,125 | 1 | — | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 0,125 | 1 | — | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 3 | Микалента на каждом проводнике в нижнем слое паза | | | 0,5 | 0,5 | | | | | | | 0,5 | 0,5 | | | | |
| | Лакировка | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Опрессовка группы изолированных проводников | — | — | — | — | — | Опрессовка | | | — | — | — | — | — | Опрессовка | | |
| 4 | Микалента вокруг группы проводников | 0,125 | 2 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,125 | 3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| | Опрессовка общей изоляции группы проводников | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Опрессовка | | | |
| 5 | Тафтяная лента впритык вокруг группы проводников | 0,2 | 1 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 1 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| | Трехкратная пропитка в лаке | — | 3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | — | 3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 6 | Картон ЭВТ на группе проводников (перекрой сверху) | 0,2 | $1^1/_4$ | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | $1^1/_4$ | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| | Опрессовка | — | — | | | Опрессовка | | | | | | | | Опрессовка | | | |
| | Припуск | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Всего на группу проводников верхнего слоя | — | — | 3,0 | 3,5 | 2,8 | 3,3 | 3,8 | 4,3 | — | — | 3,5 | 4,0 | 3,3 | 3,8 | 4,3 | 4,8 |
| | Всего на группу проводников нижнего слоя | — | — | | 3,0 | | | | | | | | 3,5 | | | | |
| | Зазор на укладку | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Суммарный размер изоляции в пазу | — | — | 6,2 | 6,7 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | — | — | 7,2 | 7,7 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| | **Лобовая часть (рис. 7)** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Микалента на каждом проводнике в верхнем слое паза | | | 0,5 | | | | | | | | 0,5 | | | | | |
| 2 | Микалента на каждой части подразделенного проводника в верхнем слое паза | 0,125 | 1 | | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 0,125 | 1 | | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 3 | Микалента на каждом проводнике в нижнем слое паза | | | 0,5 | 0,5 | | | | | | | 0,5 | 0,5 | | | | |
| 8 | Микалента вокруг группы проводников | — | — | — | | — | — | — | — | 0,125 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 9 | Тафтяная лента вполнахлеста | 0,2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| | Трехкратная пропитка в лаке | — | 3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | — | 3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| | Припуск | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | Всего на проводники верхнего слоя | — | — | 1,8 | 2,3 | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 3,5 | — | — | 2,3 | 2,8 | 2,3 | 2,9 | 3,5 | 4,1 |
| | Всего на проводники нижнего слоя | | | | 1,8 | | | | | | | | 2,3 | | | | |

Примечание. Допускаемые отклонения в размерах: по ширине ± 0,10 *мм*, по высоте +0,00; —0,20 *мм*.

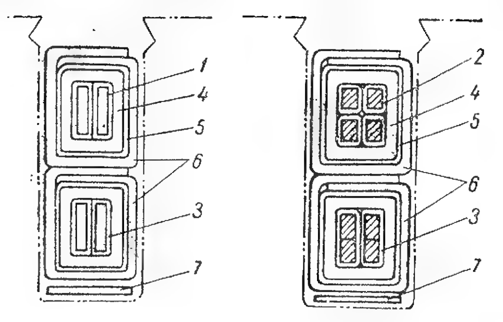



Рис. 8. Рис. 9.

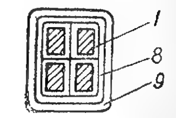



Рис. 10.

*Таблица 3*

**Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока нормального исполнения**

(Изоляция класса В — микафолиевая)

| № позиции (см. рис.) | Наименование материалов и допуски | До 500 в: Толщина материала (в мм) | До 500 в: Число слоев | До 500 в: Двусторонняя толщина изоляции (в мм), по высоте, Рис. 8 | До 500 в: по высоте, Рис. 9 | До 500 в: по ширине, число секционных сторон в одном слое паза: 1 | 2 | 3 | 4 | От 500 до 1000 в: Толщина материала (в мм) | От 500 до 1000 в: Число слоев | От 500 до 1000 в: Двусторонняя толщина изоляции (в мм), по высоте, Рис. 8 | От 500 до 1000 в: по высоте, Рис. 9 | От 500 до 1000 в: по ширине, число секционных сторон в одном слое паза: 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Пазовая часть (рис. 8 и 9)** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Микалента на каждом проводнике в верхнем и нижнем слоях паза | 0,125 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 0,125 | 1 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 2 | Микалента на каждой части подразделенного проводника в верхнем слое паза | | | — | 1,0 | | | | | | | — | — | | | | |
| | Лакировка | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Опрессовка группы изолированных проводников | — | — | — | — | — | Опрессовка | | | — | — | — | — | — | Опрессовка | | |
| 4 | Микафолий вокруг группы проводников (перекрой сбоку) | 0,12 | 2¼ | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,12 | 4¼ | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| 5 | Телефонная бумага лакированная вокруг группы проводников | 0,03 | 1¼ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 1¼ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| | Опрессовка общей изоляции группы проводников | | | | | Опрессовка | | | | | | | | Опрессовка | | | |
| | Припуск | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Всего на группу проводников верхнего слоя | — | — | 1,3 | 1,8 | 1,4 | 1,9 | 2,4 | 2,9 | — | — | 1,8 | 2,3 | 1,9 | 2,4 | 2,9 | 3,4 |
| | Всего на группу проводников нижнего слоя | — | — | | 1,3 | | | | | | | | 1,8 | | | | |
| 6 | Картон ЭВТ на группу проводников каждого слоя (перекрой сверху) | 0,2 | 1¼ | 0,6×2 | 0,6×2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 1¼ | 0,6×2 | 0,6×2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 7 | Картон ЭВТ — прокладка на дне паза | 0,3 | 1 | 0,3 | 0,3 | — | — | — | — | 0,3 | — | 0,3 | 0,3 | — | — | — | — |
| | Зазор на укладку | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Суммарный размер изоляции в пазу | — | — | 4,3 | 4,8 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | — | 1 | 5,3 | 5,8 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 |
| | **Лобовая часть (рис. 10)** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Микалента на каждом проводнике в верхнем слое паза | 0,125 | 1 | 0,5 | | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 0,125 | 1 | 0,5 | | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 2 | Микалента на каждой части подразделенного проводника в верхнем слое паза | | | — | 1,0 | | | | | | | | 1,0 | | | | |
| 3 | Микалента на каждом проводнике в нижнем слое паза | | | 0,5 | 0,5 | | | | | | | 0,5 | 0,5 | | | | |
| 8 | Микалента вокруг группы проводников | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,125 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 9 | Тафтяная лента вполнахлеста | 0,2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| | Лакировка | — | 1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | — | 1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| | Припуск | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | — | — | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | Всего на группу проводников верхнего слоя | | | 1,6 | 2,1 | 1.6 | 2,2 | 2,8 | 3,4 | — | — | 2,1 | 2,6 | 2,1 | 2,7 | 3,3 | 3,9 |
| | Всего на группу проводников нижнего слоя | | | | 1,6 | | | | | — | — | | 2,1 | | | | |

Примечание. Допускаемые отклонения в размерах: по ширине ± 0,10 *мм*; по высоте +0,00; —0,20 *мм*.

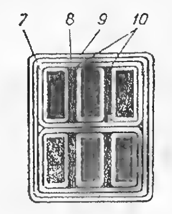


Рис. 11. Рис. 12.

*Таблица 4*

**Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока повышенной нагревостойкости на стекловолокнистой основе (изоляция класса *F*; обмотка из меди ПСД и ПСДК; напряжение до 500 *в*)**

| № позиции (рис. 11, 12) | Материал, наименование | Обозначение | Толщина (в *мм*) | Количество слоев | Толщина изоляции по высоте (в *мм*) | Толщина изоляции по ширине. Число проводников по ширине: 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Толщина изоляции одной секции (двусторонняя без витковой)** | | | | | | | | | |
| 1 | Проводники | ПСД | | | | | | | | |
| 2 | Стеклолента (пропитанная) вокруг секции | | 0,1 | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 3 | Стекломиканит вокруг секции | ГСФ-1 | 0,25 | $2\frac{1}{4}$ | 1,0 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 |
| 4 | Прокладка, стекломиканит | ПСФ-1 | 0,17 | 1 | 0,17 | — | — | — | — | — |
| 5 | Прокладка, стекломиканит | ПСФ-1 | 0,17 | | — | 0,17 | 0,34 | 0,51 | 0,68 | 0,85 |
| | Пропитка в лаке и допуски | | | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Итого толщина изоляции секции | | | | 1,57 | 1,82 | 1,99 | 2,16 | 2,33 | 2,5 |
| | Полная толщина изоляции паза | | | | | | | | | |
| | Толщина изоляции секций | | | | 3,14 | 3,64 | 3,98 | 4,32 | 4,66 | 5,0 |
| 6 | Прокладка, стекломиканит | ПСФ-1 | 0,3 | 1 | 0,3 | — | — | — | — | — |
| | Допуск на укладку | | | | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Итого полная толщина изоляции паза | | | | 3,94 | 3,84 | 4,18 | 4,52 | 4,86 | 5,2 |



*Продолжение табл. 4*

| № позиции (рис. 11, 12) | Материал, наименование | Обозначение | Толщина (в *мм*) | Количество слоев | Толщина изоляции по высоте (в *мм*) | Толщина изоляции по ширине. Число проводников по ширине: 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Толщина изоляции в лобовой части** | | | | | | | | | |
| 7 | Стеклолента пропитанная вокруг группы проводников | | 0,1 | 1 * | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 8 | Стекломикалента вокруг секции | | 0,17 | 1 * | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 |
| 9 | Стеклолента пропитанная вокруг секции | | 0,1 | 1 * | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 10 | Прокладка, стекломиканит | ПСФ-1 | 0,17 | | — | 0,17 | 0,34 | 0,51 | 0,68 | 0,85 |
| | Пропитка в лаке и допуск | | | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Итого толщина изоляции секции | | | | 1,68 | 1,85 | 2,02 | 2,19 | 2,36 | 2,53 |

*Таблица 5*

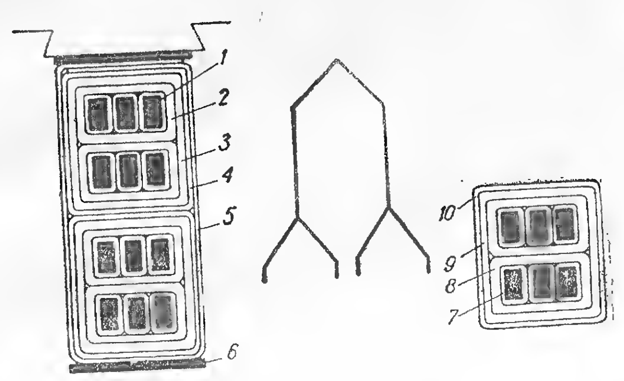


Рис. 13. Рис. 14.

**Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока типа Латура-Перре (изоляция класса В; обмотка из голой меди; напряжение до 1000 *в*; исполнение нормальное и влагостойкое)**

| № позиции (рис. 13, 14) | Материал, наименование | Толщина (в *мм*) | Количество слоев | Толщина изоляции по высоте | Толщина изоляции по ширине. Число проводников по ширине: 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Толщина изоляции одной секции (двусторонняя)** | | | | | | | | |
| 1 | Микалента вокруг проводника | 0,1 | 1* | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 |
| | Пропитка и допуски на междувитковую изоляцию | | | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |

* Количество слоев вполнахлеста.

| № позиции (рис. 13, 14) | Материал, наименование | Толщина (в мм) | Количество слоев | Толщина изоляции по высоте | Толщина изоляции по ширине. Число проводников по ширине: 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | Микалента вокруг группы | 0,1 | 2* | 1,6 | 0,8 | 0,8 | 0.8 | 0,8 | 0,8 |
| 3 | Микалента вокруг секции | 0,1 | 2* | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0.8 | 0.8 |
| 4 | Стеклолента пропитанная | 0,1 | 1* | 0,4 | 0,4 | 0.4 | 0,4 | 0,4 | 0.4 |
| | Пропитка в лаке и допуски | | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0.2 | 0,2 |
| | Итого толщина изоляции секции | | | 4,2 | 2,9 | 3,4 | 3.9 | 4,4 | 4.9 |
| | Полная толщина изоляции паза | | | | | | | | |
| | Толщина изоляции секций | | | 8,4 | 2,9 | 3,4 | 3,9 | 4,4 | 4.9 |
| 5 | Гильза из электрокартона | 0,1 | | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0.2 | 0,2 | 0.2 |
| 6 | Прокладки из микаэлектрокартона | 0,5 | 2 | 1.0 | — | — | — | — | — |
| | Допуск на укладку | | | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0.2 | 0,2 |
| | Итого полная толщина изоляции паза | | | 10,2 | 3,3 | 3.8 | 4.3 | 4.8 | 5,3 |
| | Толщина изоляции в лобовой части | | | | | | | | |
| 7 | Микалента вокруг проводника | 0,1 | 1* | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2.0 |
| | Пропитка и допуск на междувитковую изоляцию | | | 0,7 | 0,55 | 0,7 | 0,85 | 1,0 | 1.15 |
| 8 | Микалента вокруг группы | 0,1 | 2* | 1,6 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0.8 | 0,8 |
| 9 | Микалента вокруг секции | 0,1 | 2* | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 10 | Стеклолента пропитанная | 0,1 | 1* | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0.4 |
| | Пропитка в лаке и допуск | | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Итого толщина изоляции секции | | | 4,5 | 3,15 | 3,7 | 4,25 | 4,8 | 5,35 |

| Часть | Размер секции | | Отклонение |
|---|---|---|---|
| Пазовая | по высоте | Медь × число проводников + + толщина изоляции | ± 0,5 |
| | по ширине | | ± 0,2 |
| Лобовая | по высоте | | +1,0; —0,5 |
| | по ширине | | ± 0,5 |

Примечания: 1. Изоляцию головки каждой группы проводников выполнить тремя слоями микаленты толщиной 0,1 *мм* вполнахлеста.

2. Вылеты прямых частей секции из паза должны быть не менее 25 *мм*.

* Количество слоев вполнахлеста (микалента и стеклолента).



Рис. 15.

Рис. 16.

*Таблица 6*

**Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока**

(Для крупных электродвигателей и электродвигателей, работающих в особо тяжелых условиях (прокатные двигатели и др.). Медь голая, прямоугольная, напряжение до 1000 *в*.
Длина пакета жестей свыше 500 *мм*. Изоляция кл. В., исполнение — влагостойкое).

| Часть | № позиции (рис. 15, 16) | Материал: Наименование | Марка по ГОСТу | Толщина (в мм) | Количество слоев | Толщина изоляции по высоте | Толщина изоляции по ширине (в мм). Количество проводников: 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Толщина изоляции одной секции | | | | | | | | | | | |
| Пазовая | 1 | Микалента * . . . | ЛФ41 | 0,1 | 1 вполнахлеста | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 |
| | 2 | Лента стеклянная пропитанная . . | | 0,1 | 1 впритык через виток | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0.4 | 0,4 |
| | 3 | Прокладка из микабумаги . . . . | ГМО | 0,2 | 1 | 0,2 | — | — | — | — | — |
| | 4 | Бумага телефонная лакированная ** | | 0,05 | 1 в разб. | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0.1 | 0,1 |
| Пропитка в лаке Л1100 и на изол. матер. и провод | | | | | | | | | | | |
| | 5 | Микалента ** . . | ЛФ41 | 0,1 | 4 вполнахлеста | 0,35<br>1,6 | 0,30<br>1,6 | 0,40<br>1,6 | 0,50<br>1,6 | 0,60<br>1,6 | 0,70<br>1,6 |
| | 6 | Лента стеклянная пропитанная ** . | | 0,1 | 1 вполнахлеста | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| | | Итого толщина изоляции секции | | | | 3,80 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,7 | 5,2 |
| Полная толщина изоляции паза | | | | | | | | | | | |
| | | Толщина изоляции секций . . . . . | | | | 7,6 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,7 | 5,2 |
| | 7 | Гильза из электрокартона . . . . | ЭВ | 0,1 | | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | 8 | Прокладка из электрокартона . . | ЭВ | 0,2 | 1 | 0,2 | — | — | — | — | — |
| | 9 | Прокладка микаэлектрокартона | | 0,5 | 1 | 0.5 | — | — | — | — | — |
| | | Допуск на укладку | | | | 0.5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | | Итого полная толщина изоляции паза . . . . . . | | | | 9,1 | 3,4 | 3,9 | 4,4 | 5,1 | 5,6 |

| Часть | № позиции (рис. 15, 16) | Материал: Наименование | Материал: Марка по ГОСТу | Толщина (в *мм*) | Количество слоев | Толщина изоляции по высоте | Толщина изоляции по ширине (в *мм*), количество проводников: 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Толщина изоляции одной секции** | | | | | | | | | |
| Лобовая | 10 | Микалента * . . . | ЛФ41 | 0,1 | 1 вполнахлеста | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2,0 |
| | 11 | Лента стеклянная пропитанная ** . | | 0,1 | 1 впритык через виток | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 |
| | 12 | Лента стеклянная пропитанная ** . | | 0,1 | 1 впритык | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | | Пропитка в лаке Л1100 и допуск | | | | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,3 |
| | 13 | Микалента ** . . . | ЛФ41 | 0,1 | 3 вполнахлеста | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| | 14 | Лента стеклянная пропитанная ** . | | 0,1 | 1 вполнахлеста | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| | | Итого толщина изоляции секции | | | | 3,7 | 2,9 | 3,5 | 4,1 | 4,9 | 5,3 |

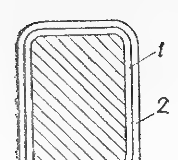



Рис. 17.

*Таблица 7*

**Изоляция стержней компенсационных обмоток машин постоянного тока (обмотка стержневая; напряжение до 1000 *в*; изоляция класса В; исполнение нормальное, влагостойкое и усиленное влагостойкое)**

| № позиции (рис. 17) | Материал, наименование | Толщина (в *мм*) | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*): Количество слоев | По высоте | По ширине |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Микафолий . . . . . . | 0,15 | $4^{1}/_{4}$ | 1,2 | 1,35 |
| 2 | Бумага телефонная лакированная . . . . . | 0,05 | 6 | 0,6 | 0,6 |
| | Общая толщина изоляции стержня . . . . | | | 1,8 | 1,95 |
| 3 | Гильза из электрокартона ЭВ . . . . . . | 0,2 | 1 | 0,6 | 0,4 |
| | Допуск на укладку . . | | | 0,6 | 0,45 |
| | Общая толщина изоляции паза . . . . . | | | 3,0 | 2,8 |

Допускаемые отклонения (в *мм*): по толщине изоляции ±0,3; по длине изоляции +3,0.

* Вокруг каждого проводника.
** Вокруг группы проводников.





## ИЗОЛЯЦИЯ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### Высоковольтная изоляция

Пазовая изоляция: 1. Микалента: а) на асфальтовом лаке; б) на термореактивном компаунде (термоластик, эпоксидный компаунд); в) на кремнийорганических лаках (данные табл. 4, 6 и рис. 3, 5).

2. Стеклотекстолит на эпоксидных смолах и лаках. Провода марок ПДА (асбестоновый), ППТБО — пленочная изоляция.

3. Эскапоновая изоляция (на основе синтетического каучука): а) твердый эскапон; б) эскапоновые компаунды и лаки; в) электроизоляционные лакоткани; г) эскапонированные бумаги, фольги, липкие ленты и др. [152]. Свойства: высокая температуро-, влаго- и химостойкость, высокие изоляционные качества, механическая прочность и эластичность.

Стеклоэскапоновая лакоткань представляет собой стеклополотно, нити которого цементированы и покрыты калиброванным слоем эскапонового полимера. Стеклоткань толщиной 0,06 *мм* после покрытия получается 0,16—0,18 *мм*. Пробивное напряжение при $\Delta = 0{,}17$ *мм* составляет 8780 *в* (после растяжения 2940 *в*). Разрывное напряжение 8 *кг/мм*². 

Липкая стеклоэскапоновая лента. Обычно многослойная изоляция проходит процесс компаундирования (пропитку битумным компаундом при температуре 150—170° С и давлении порядка 7 *ат*). Стеклоэскапоновая лакоткань с нанесенным липким слоем позволяет устранить процесс компаундирования. После наложения слоев изоляции в обжатом состоянии при температуре 120—150° С выдерживается до превращения в твердое монолитное состояние.

Эскапоновый стеклофолий получается путем нанесения на стеклоэскапоновую лакоткань слоя бакелитового и слоя глифталевого лака. Применение: эскапоновая изоляция применяется для изоляции обмоток статоров и роторов асинхронных и синхронных машин на 3000 *в* и выше. Двухсторонняя толщина корпусной изоляции на 3000 *в* равна 3,9 *мм*, т. е. равна толщине микалентной изоляции. Для ротора на напряжение 600 *в* двухсторонняя толщина равна 1,3 *мм*, т. е. также равна толщине микалентной изоляции.

4. Слюдинит. Изготовляется из отходов слюды в виде твердых материалов или в виде ленты с добавлением микалентной бумаги или стеклоленты (стеклофолий, слюдинитофолий). Толщина — от 0,08 до 0,2 *мм*. Механическая прочность слюдинитовой ленты значительно уступает прочности микаленты и эскапоновой ленты (2 *кг/мм*²). Может применяться в качестве пазовой изоляции в нормальных машинах до 500 *в* и в отдельных случаях до 3000 *в*. Есть основания ожидать усовершенствования качества слюдинита посредством применения новых типов связующих синтетических материалов и смол.

### Низковольтная изоляция

1. Хлопчатобумажная изоляция класса А (табл. 2, 3 и рис. 1, 2).
2. Низковольтная изоляция класса В (табл. 2, 4 и рис. 1, 3).
3. Синтетические пленки (хостафан, майлар, лавсан) для пазовой и витковой изоляции в машинах до 500 *в*; употребляется как влагостойкая изоляция; температура соответствует классу А.
4. Стеклянная изоляция на кремнийорганических лаках. Обмоточный провод ПСДК; пазовая изоляция — гибкий стекломиканит на кремнийорганическом лаке толщиной 0,35 *мм*, склеенный с черной стеклотканью толщиной 0,15 *мм*. Для крановых двигателей постоянного тока применяются голые провода и провода марок ПСДК и ПЭТКСО. Пазовые клинья из стеклотекстолита. Рабочие длительные температуры до 150° С (перегрев 115° С, табл. 7 и рис. 6).
5. Анодированная пленка при употреблении алюминия вместо меди. Этот вид изоляции и проводникового материала является весьма прогрессивным, т. к. позволяет повысить коэффициент заполнения обмоточного пространства, снизить габариты и стоимость машины.

*Таблица 1*

**Классы и материалы изоляции**

| Классы изоляции | Обмоточный провод | Корпусная и междукатушечная изоляция | Пропитка | Покрытие |
|---|---|---|---|---|
| A | ПБД | Микаэлектрокартон | Асфальтомасляный лак | Пигментированная эмаль глифталемасляная |
| B | ПСД | То же | То же | |
| *F* (BC) | ПСД | Стекломиканит на глифталемасляном лаке | Глифталемасляный лак | |
| *H* (CB) | ПСДК | То же на кремнийорганической основе | Кремнийорганический лак типа ЭФ | То же кремнийорганическая |

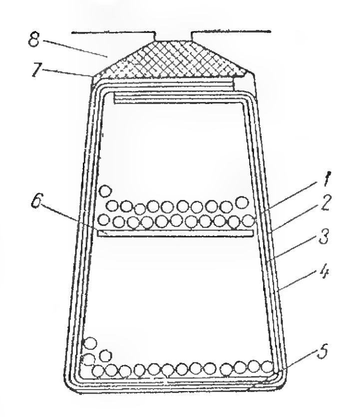


Рис. 1.

*Таблица 2*

**Пазовая изоляция статорных обмоток машин переменного тока при полузакрытых пазах до 550 *в***

| № позиции | Наименование: Изоляция класса A | Наименование: Изоляция класса B | По ширине паза: Число слоев | По ширине паза: Общая толщина (в *мм*) | По высоте паза (без клина): Число слоев | По высоте паза (без клина): Общая толщина (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Провод ПЭЛШО, ПЭЛБО, ПБД | Провод ПДА, ПСД, ПЭВ-2 или ПЭТСО | — | — | — | — |
| 2 | Электрокартон ЭВ или ЭТ | Летероид (0,1 ÷ 0,3 *мм*) | 2 | 0,2÷0,6 | 3 | 0,3÷0,9 |
| 3 | То же | То же | 2 | 0,2÷0,6 | 3 | 0,3÷0,9 |
| 4 | Лакоткань х. б. (0,15÷0,3) или шелковая (0,06 — 0,12 *мм*) | Миканит гибкий (0,15÷÷0,3 *мм*) или стеклоткань (0,12÷0,17 *мм*) | 2<br>2 | 0,3÷0,6<br>0,12÷0,24 | 3<br>3 | 0,45÷0,9<br>0,18÷0,51 |
| 5 | Электрокартон ЭВ (0,3÷0,5 *мм*) | Миканит прокладочный (0,3÷0,5 *мм*) | — | — | 1 | 0,3÷0,5 |
| 6 | То же | То же | — | — | 1 | 0,3÷0,5 |
| 7 | То же | То же | — | — | 1 | 0,3÷0,5 |
| 8 | Клин буковый, пропитанный льняным маслом, или фибровый (1÷3 *мм*) | Клин из текстолита, гетинакса или стеклотекстолита (1÷÷3 *мм*) | — | — | 1 | 1÷3 |
| | | Всего | $2\Delta_i = 0{,}52 \div 1{,}8$ | | $\Delta_h = 1{,}42 \div 4{,}2$ | |





Примечание. В однослойной обмотке прокладка 5 отсутствует.

*Таблица 3*

**Гильзовая пазовая изоляция статорных обмоток машин переменного тока при полуоткрытых пазах до 550 *в* (класс A)**

9
8
1
2
3
7
4
5
6

Рис. 2.

| № позиции | Наименование | По ширине паза: Число слоев | По ширине паза: Общая толщина (в *мм*) | По высоте паза: Число слоев | По высоте паза: Общая толщина (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Провод ПБД без дополнительной витковой изоляции | — | — | — | — |
| 2 | Обутюжка сторон раздвоенной катушки бумагой телефонной, лакированной 0,07 *мм* в $1^1/_4$ слоя вполнахлеста | 6 | 0,42 | 4 | 0,28 |
| 3 | Изоляция паза: электрокартон ЭВ 0,15 *мм* | 2 | 0,3 | 3 | 0,45 |
| 4 | Изоляция паза: лакоткань х. б. 0,2 *мм* | 2 | 0,4 | 3 | 0,6 |
| 5 | Изоляция паза: электрокартон ЭВ 0,2 *мм* | 2 | 0,4 | 3 | 0,6 |
| 6 | Прокладка — электрокартон ЭВ | — | — | 1 | 0,3 |
| 7 | Прокладка — электрокартон ЭВ | — | — | 1 | 0,5 |
| 8 | Прокладка — электрокартон ЭВ | — | — | 1 | 0,2 |
| | Разбухание изоляции от пропитки | — | 0,4 | — | 0,4 |
| | Зазор на укладку (не менее) | — | 0,8 | — | 1,0 |
| 9 | Клин буковый, пропитанный льняным маслом, или фибровый | — | — | — | 4÷6 |
| | Всего (без клина) | $2\Delta_i = 2{,}72$ | | $\Delta_h = 4{,}33$ | |

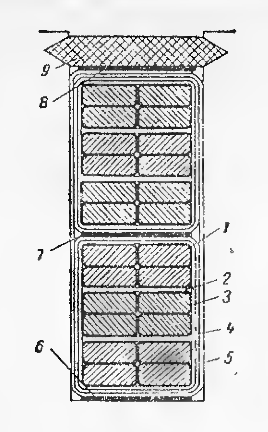



Рис. 3.

*Таблица 4*

**Гильзовая пазовая изоляция статорных обмоток машин переменного тока при открытых пазах 550, 3150 и 6300 *в* (классы А и В)**

| № позиции | Наименование | Двусторонняя изоляция: до 550 *в* (усиленная), Число слоев | до 550 *в* (усиленная), Общая толщина (в *мм*) | 3150 *в*, Число слоев | 3150 *в*, Общая толщина (в *мм*) | 6300 *в*, Число слоев | 6300 *в*, Общая толщина (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Класс изоляции | А | | В | | В | |
| 1 | Провод ПБД, ПБОО, ПДА, ПСД | — | — | — | — | — | — |
| 2 | Прокладки между витками: электрокартон ЭВ 0,2 *мм*, миканит 0,3 *мм* (если больше 20 *в* на виток) | | | | $h_B = 0{,}2$ | | $h_B = 0{,}3$ |
| 3 | Изоляция катушки: | | | | | | |
| | лакоткань 0,3 *мм* в $2^1/_2$ слоя | 4 | 1.2 | — | — | — | — |
| | микафолий 0,25 *мм* в $5^1/_4$ слоя | — | — | 10 | 2,5 | — | — |
| | » 0,25 *мм* в $9^1/_4$ слоя | — | — | — | — | 18 | 4,5 |
| 4 | Изоляция катушки: | | | | | | |
| | лента миткалевая 0,15 *мм* в 1 слой | 2 | 0.3 | — | — | — | — |
| | летероид 0,15 *мм* в 1 слой | — | — | 2 | 0,3 | 2 | 0,3 |
| 5 | Изоляция паза: | | | | | | |
| | электрокартон ЭВ 0,15 *мм* в $1^1/_4$ слоя | 2 | 0,3 | — | — | — | — |
| | летероид 0,15 *мм* в $1^1/_4$ слоя | — | — | 2 | 0,3 | 2 | 0,3 |
| 6 | Прокладка — электрокартон ЭВ 0,3 *мм* | 1 | 0,3 | 1 | 0,5 | 1 | 0,3 |
| 7 | Прокладка — электрокартон ЭВ 1,5÷2,0 *мм* | 1 | 1.5 | 1 | 1,7 | 1 | 2.0 |
| 8 | Прокладка — электрокартон ЭВ 0,3÷0,5 *мм* | 1 | 0,3 | 1 | 0,3 | 1 | 0,5 |
| 9 | Клин буковый промасленный или гетинаксовый | | | | | | |





| № позиции | Наименование | Двусторонняя изоляция: до 550 *в* (усиленная), Число слоев | до 550 *в* (усиленная), Общая толщина (в *мм*) | 3150 *в*, Число слоев | 3150 *в*, Общая толщина (в *мм*) | 6300 *в*, Число слоев | 6300 *в*, Общая толщина (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Класс изоляции | А | | В | | В | |
| | Полная толщина изоляции: | | | | | | |
| | по ширине | — | 2,55 | — | 3,5 | — | 5,5 |
| | по высоте | — | 6,75 | — | 9,7 | — | 14,0 |

Примечания: 1. Полная толщина изоляции дана с учетом разбухания и допуска на укладку.

2. $h_B$ — толщина прокладки между активными проводниками; общая толщина прокладок по высоте $h_B \times (s'_п - 2)$.

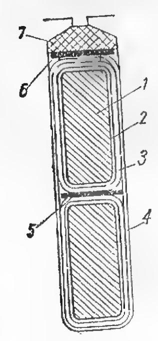



Рис. 4.

*Таблица 5*

**Гильзовая пазовая изоляция роторных стержневых обмоток машин переменного тока с контактными кольцами при полузакрытых пазах до 300, 500, 750, 1000 и 1500 *в***

| № позиции | Наименование | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*) при напряжении (в *в*): до 300 | 300÷500 | 500÷750 | 750÷1000 | 1000÷1500 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Класс изоляции | А | А | В | В | В |
| 1 | Стержень обмотки — голая медь . . . . . . . . . . | — | — | — | — | — |
| 2 | Изоляция стержня: | | | | | |
| | бумага телефонная лакированная 0,07 *мм*, 6 слоев . . . . . . . | 0,84 | — | — | — | — |
| | бумага телефонная лакированная 0,07 *мм*, 10 слоев . . . . . . . . . | — | 1,4 | — | — | — |

*Продолжение табл. 5*

| № позиции | Наименование | Двусторонняя толщина изоляции (в *мм*) при напряжении (в *в*) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | до 300 | 300÷500 | 500÷750 | 750÷1000 | 1000÷1500 |
| | Класс изоляции | А | А | В | В | В |
| | микалента 0,13 *мм* вполнахлеста, 1 слой . . . . | — | — | 0,52 | 0,52 | — |
| | микалента 0,13 *мм* вполнахлеста, 2 слоя . . . . | — | — | — | — | 1,04 |
| 3 | Изоляция стержня: | | | | | |
| | микафолий 0,2 *мм* в 2¹/₄ слоя . . . . . . . . . . | — | — | 0,8 | — | — |
| | микафолий 0,2 *мм* в 3¹/₄ слоя . . . . . . . . . . | — | — | — | 1,2 | — |
| | микафолий 0,2 *мм* в 4¹/₄ слоя . . . . . . . . . . | — | — | — | — | 1,6 |
| | летероид или электрокартон ЭВ 0,15 *мм*, 1 слой | — | — | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 4 | Изоляция паза: | | | | | |
| | тероид или электрокартон ЭВ 0,2 *мм* в 1¹/₄ слоя . . . . . . . . . . | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 5 | Прокладка — электрокартон ЭВ 0,5 *мм* . . . . . | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 6 | Прокладка — электрокартон ЭВ 0,3 *мм* . . . . . | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 7 | Клин буковый пропитанный или гетинаксовый . | — | — | — | — | — |
| | Полная толщина изоляции: | | | | | |
| | по ширине . . . . . . . . | 1,54 | 2,1 | 2,32 | 2,72 | 3,64 |
| | по высоте . . . . . . . . | 4,08 | 5,2 | 6,74 | 7,54 | 9,38 |



Рис. 5.

*Таблица 6*

**Непрерывная пазовая изоляция двухслойных катушечных и стержневых статорных обмоток машин переменного тока при открытых пазах 3150, 6300, 10 500 и 13 800 *в* (класс В)**

| № позиции | Наименование | Двухсторонняя толщина изоляции (в *мм*) | |
|---|---|---|---|
| | | Катушечная обмотка | Стержневая обмотка |
| 1 | Провод ПБД, ПДА, ПСД | — | — |
| 2 | Прокладка по высоте—миканит 0,3÷0,5 *мм* . . | — | 0,3÷0,5 |
| 3 | Витковая изоляция: микалента 0,13÷0,15 *мм* при напряжении: | | |
| | 3150 *в*—1 слой вполнахлеста | 0,52 | — |
| | 6300 *в*—1÷2 вполнахлеста | 0,52÷1,04 | — |
| | 10500 *в*—2 вполнахлеста | 1,04 | — |
| | 13800 *в*—2 вполнахлеста | 1,2 | — |
| 4 | Изоляция катушки или стержня: микалента 0,13÷0,15 *мм* | | |
| | 3150 *в*—5 слоев вполнахлеста | 3,5 | 3,5 |
| | 6300 *в*—9 вполнахлеста | 5,4 | 5,4 |
| | 10500 *в*—14 вполнахлеста | 8,4 | 8,4 |
| | 13800 *в*—17 вполнахлеста | 10,2 | 10,2 |
| 5 | Изоляция катушки или стержня: | | |
| | лента киперная 0,3 *мм* 1 слой впритык (3150÷6300 *в*) . . . | 0,6 | 0,6 |
| | лента асбестовая железистая 0,5 *мм* 1 слой впритык (10500÷13800 *в*) . . . . . | 1,0 | 1,0 |
| 6 | Прокладка — миканит прокладочный или электрокартон ЭВ . . . . . | 1,0÷2,0 | 1,0÷2,0 |
| 7 | Прокладка — то же . . . | 2,0÷3,0 | 2,0÷3,0 |
| 8 | Прокладка — то же . . . | 1,0÷1,5 | 1,0÷1,5 |
| 9 | Клин буковый пропитанный или гетинаксовый . | — | — |
| | Полная толщина пазовой изоляции по ширине: | | |
| | 3150 *в* . . . . . | 5,1 | 5,9 |
| | 6300 *в* . . . . . | 7,0÷7,5 | 8,3 |
| | 10500 *в* . . . . . | 10,9 | 10,5 |
| | 13800 *в* . . . . . | 12,4 | 12,0 |

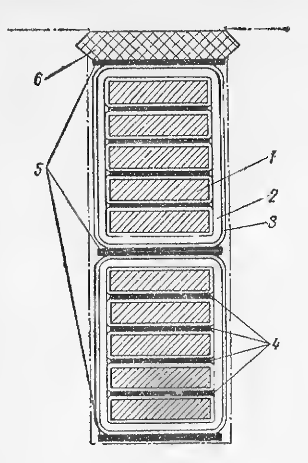



Рис. 6.

*Таблица 7*

**Непрерывная пазовая изоляция двухслойных катушечных статорных обмоток машин переменного тока до 600 *в* [класс *F (BC)* и *H (CB)*]**

| № позиции | Наименование | Толщина изоляции (в *мм*) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | По ширине | | По высоте | |
| | | Число слоев | Общая толщина | Число слоев | Общая толщина |
| 1 | Провод марки ПСД, ПСДК . . . . | — | — | — | — |
| 2 | Изоляция секции: стекломикалента 0,17 *мм* два слоя вполнахлеста . | 8 | 1,36 | 8 | 1,36 |
| 3 | Изоляция секции: стеклолента пропитанная 0,1 *мм* один слой впритык . . . . . . . . . . . . . . | 2 | 0,2 | 2 | 0,2 |
| 4 | Прокладки между проводниками — стекломикалента 0,17 *мм*, 1 слой | — | — | $h_B = 0{,}17$ | |
| 5 | Прокладки — стеклотекстолит или стекломиканит 0,5 *мм*, 1 слой . . | — | — | 3 | 1,5 |
| | Разбухание от пропитки и допуск на укладку . . . . . . . . . . | — | 0,7÷0,8 | — | 1,0÷1,3 |
| 6 | Клин стеклотекстолитовый . . . . | — | — | — | — |
| | Полная толщина изоляции секции с учетом разбухания (двухсторонняя) . . . . . . . | | 1,96 | | 1,96 |



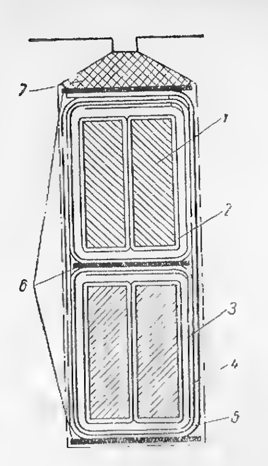



Рис. 7.

*Таблица 8*

**Гильзовая пазовая изоляция роторных стержневых обмоток асинхронных двигателей с фазным ротором до 500 *в***

[класс *F (BC)* и *H (CB)*]

| № позиции | Наименование | Толщина изоляции (в *мм*) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | По ширине | | По высоте | |
| | | Число слоев | Общая толщина | Число слоев | Общая толщина |
| 1 | Проводник голый . . . . . . . . . | — | — | — | — |
| 2 | Изоляция проводника: стекломикалента 0,17 *мм*, 1 слой вполнахлеста . . . . . . . . . . . . | 4 | 0,68 | 4 | 0,68 |
| 3 | Изоляция секции: стекломикафолий или стеклофолий 0,2 *мм* $2^1/_4$ слоя | 4 | 0,8 | 5 | 1,0 |
| 4 | Изоляция секции: стеклоткань 0,06 *мм*, 2 слоя . . . . . . . . | 4 | 0,24 | 4 | 0,24 |
| 5 | Изоляция паза: электрокартон ДП 0,1 *мм* $1^1/_4$ слоя . . . . . . . . | 2 | 0,2 | 3 | 0,3 |
| 6 | Прокладки — стеклотекстолит или стекломиканит 0,5 *мм* . . . . . | — | — | 3 | 1,5 |
| | Допуск на укладку . . . . . . . | — | 0,4÷0,5 | — | 0,6÷0,8 |
| 7 | Клин стеклотекстолитовый . . . . | — | — | — | — |
| | Полная толщина изоляции паза (двухсторонняя, включая изоляцию витков) . . . | | 1,92 | | 3,72 |

**Толщина гильзовой изоляции для длинных (1) и коротких (2) машин**

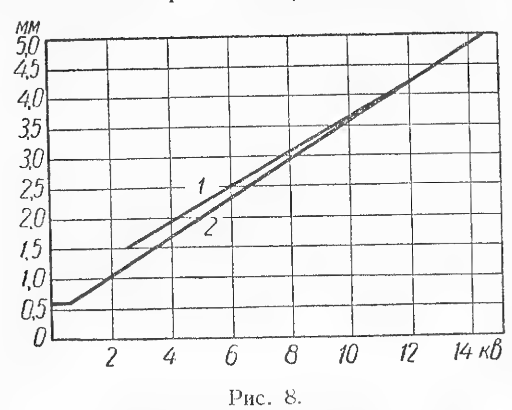



Рис. 8.

**Суммарная толщина пазовой изоляции и воздушных промежутков для глубины (1) и ширины (2) паза**

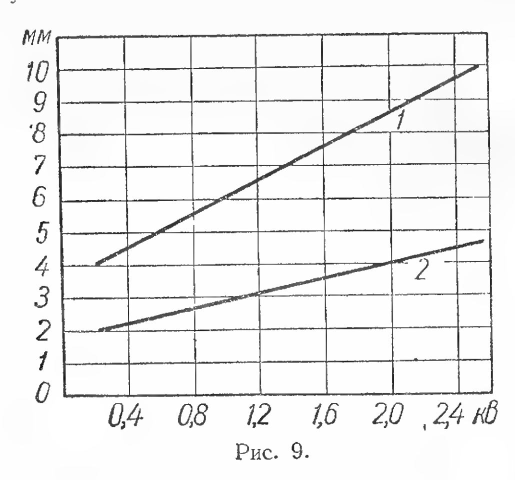



Рис. 9.

*Приложение VI*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ВИТКА ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. Обмотки статоров синхронных и асинхронных машин:

1. Жесткие секции (непрерывная и гильзовая изоляции) $l_w = 2(l_л + l)$,

где

$$l_л = \frac{\pi (D + h_п) y}{2p\sqrt{1 - \left(\frac{b_п + s_i}{t_1}\right)^2}} + \pi\left(R_1 + \frac{h_п}{4}\right) + 2A;$$

$A$ и $s_i$ — по табл. 1 и 2;

$R_1$ — радиус закругления (рис. 1).



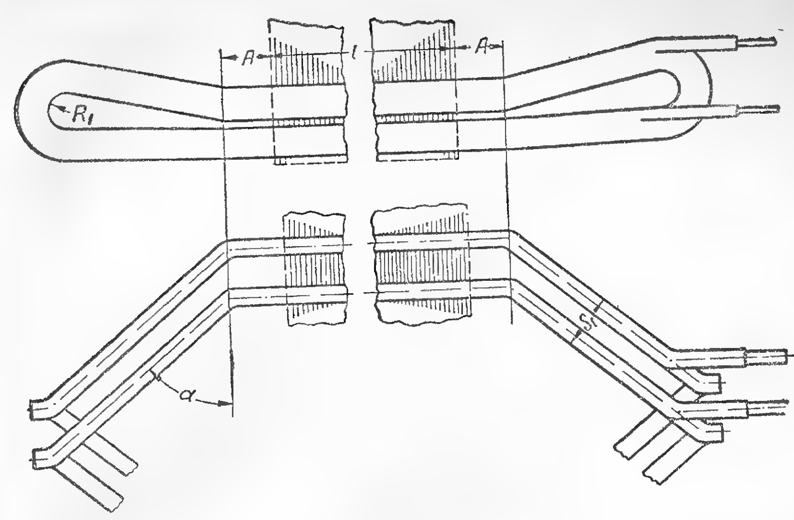



Рис. 1.

Его значения приведены ниже:

| $U_л$, в | $R_1$, см |
|---|---|
| до 3000 | 1,2 |
| 6000 | 1,5 |
| (10 500—13 800) | 2,0 |

2. Мягкие секции (всыпная обмотка)

$$l_л = A\frac{\pi (D + h_п) y_л}{Z_1} + Б,$$

$A$ и $Б$ по табл. 3.

*Таблица 1*

**Вылет лобовой части**

| Напряжение (в в) | А (в см) | |
|---|---|---|
| | Непрерывная изоляция | Гильзовая изоляция |
| До 525 | — | 2,5—3,0 |
| 3 000— 3 150 | 3,0—4,0 | 3,0—4,5 |
| 6 000— 6 300 | 4,5—5,0 | 6,0—7,0 |
| 10 500—15 000 | 6,0—6,5 | — |

*Таблица 2*

**Расстояние между секциями $s_i$, см**

| Напряжение (в в) | Высота катушки | |
|---|---|---|
| | до 5 см | свыше 5 см |
| До 525 | 0,45 | 0,55 |
| 3000— 3 150 | 0,45 | 0,60 |
| 6 000— 6 300 | 0,50 | 0,65 |
| 10 000—15 000 | — | 1,00 |

*Таблица 3*

**Значения величин для расчета $l_л$**

| 2p | Пакет, запрессованный в корпус | | Пакет без корпуса | |
|---|---|---|---|---|
| | А | Б (в *см*) | А | Б (в *см*) |
| 2 | 1,3 | 3,0 | 1,25 | 2,0 |
| 4 | 1,35 | 3,0 | 1,3 | 2,0 |
| 6 | 1,45 | 3,0 | 1,4 | 2,0 |
| 8 | 1,55 | 3,0 | 1,5 | 2,0 |

Б. Обмотка ротора асинхронного двигателя (волновая обмотка, секции жесткие)

$$l_л = \frac{\pi (D - 2\delta - h_п) y}{2p \sqrt{1 - \left(\frac{b + a_1}{t_{23}}\right)^2}} + 16 \text{ см},$$

где $b$ — ширина секции без пазовой изоляции;
$t_{23}$ — пазовый шаг ротора по дну паза;
$a_1$ — по табл. 4.

*Таблица 4*

**Толщина изоляции**

| Напряжение ротора (в *в*) | до 350 | до 500 | 500—1000 | 1000—1500 | 1500—2000 |
|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ (в *см*) | 0,17 | 0,18 | 0,2 | 0,26 | 0,29 |

В. Однорядные обмотки возбуждения явнополюсных машин:

1. Шинная медь, намотанная на ребро с одним радиусом закругления (рис. 2,*а*)

$$l_{wf} = 2 (l_m - \Delta'') + \pi (b_m + 2\Delta_{if} + b_{Cu\,f}),$$

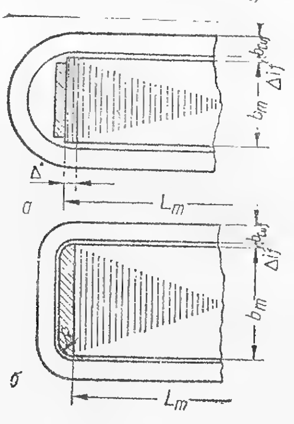



Рис. 2.



где $\Delta_{if} = 0{,}25 \div 0{,}35$ *см* — толщина изоляции полюса;
$\Delta''$ — расстояние от центра закругления до края штампованной части:

| $b$, *мм* | до 60 | 60—100 | 101—120 | 121—150 | 151—200 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta''$, *мм* | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 20,0 | 30,0 |

2. Шинная медь, намотанная на ребро, с двумя радиусами закругления (рис. 2,*б*)

$$l_{wf} = 2 (l_m + b_m - 2R) + \pi (2R + 2\Delta_{if} + b_{Cu\,f}),$$

где $R$ — радиус закругления полюсной щеки.

Г. Многовитковые обмотки роторов турбогенераторов

$$l_{wR} = 2 (l_R + l_{лR}),$$

где

$$l_{лR} = 2c_2 + b_{Cu\,f} \frac{Z_R}{p} + c_2' \left(\frac{Z_R}{4} - 1\right) + k_\gamma \frac{D_{Cu\,cp}}{p} - 0{,}86 \left(R'_{Cu} + \frac{b_{Cu\,f}}{2}\right);$$

$c_2$, $c_2'$, $D_{Cu\,cp}$, $R'_{Cu\,R}$ — по рис. 3 и табл. 5;

$$k_\gamma = (1 - 0{,}5\gamma) \frac{\pi}{2}.$$

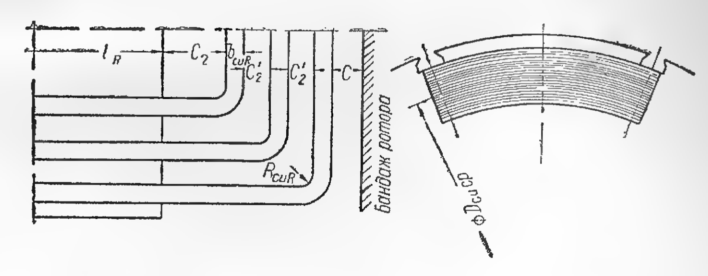



Рис. 3.

*Таблица 5*

**Данные для расчета**

| $D_{Cu\,cp}$ (в *см*) | $c_2$ (в *см*) | $c_2'$ (в *см*) | $c$ (в *см*) | $R'_{Cu\,R}$ (в *см*) |
|---|---|---|---|---|
| 50 | 4,5 | 1,0 | 1,0 | 2,5 |
| 51—70 | 5,0 | 1,2 | 1,5 | 3,0 |
| 71—80 | 6,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 |
| 81—90 | 8,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 |
| 91—100 | 8,0—10,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |

*Приложение VII*

# ЩЕТКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Таблица 1*

**Характеристика щеток для электрических машин**

ГОСТ 2332—43 488

| Группа щеток | Марки | Нормальная плотность тока (в *а/см²*) | Максимальная окружная скорость (в *м/сек*) | Удельное нажатие (в *г/см*) | Удельное электросопротивление (в *ом мм²/м*) | Переходное падение напряжения на пару щеток (в *в*) | Коэффициент трения при 15 *м/сек* | Износ за 50 час. работы при 15 *м/сек* (в *мм*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Угольно-графитные | Т-2, Т-6 | 6 | 10 | 200—250 | 40—60 | 2 + 0,5 | 0,30 | 0,10 |
| | УГ-2, УГ-4 | 8 | 15 | 200—250 | 18—30 | 2 + 0,4 | 0,25 | 0,30 |
| Графитные | Г-1 | 7 | 12 | 200—250 | 30—46 | 2,2 ± 0,5 | 0,30 | 0,20 |
| | Г-2 | 8 | 15 | 200—250 | 25—37 | 1,7 ± 0,5 | 0,25 | 0,15 |
| | Г-3 | 10—11 | 25 | 200—250 | 10—20 | 1,9 ± 0,4 | 0,25 | 0,20 |
| | Г-6, 8; Г-58 | 9 | 18 | 200—250 | 26—42 | 2,2 ± 0,6 | 0,25 | 0,20 |
| Электро-графитные | ЭГ-2 | 10 | 25 | 200—250 | 20—30 | 2,75 ± 0,6 | 0,20 | 0,10 |
| | ЭГ-4 | 12 | 40 | 150—200 | 10—16 | 2 ± 0,4 | 0,20 | 0,25 |
| | ЭГ-8, 6 | 10 | 40 | 200—400 | 40—50 | 2,4 ± 0,5 | 0,25 | 0,15 |
| | ЭГ-14, 10; ЭГ-83 | 10—11 | 40 | 200—400 | 26—38 | 2,5 ± 0,5 | 0,25 | 0,15 |
| Медно-графитные | М-1; М-3 | 12 | 20 | 150—200 | 7—12 | 1,8 ± 0,4 | 0,25 | 0,15 |
| | М-6 | 15 | 25 | 150—200 | 2—6 | 1,5 ± 0,5 | 0,20 | 0,15 |
| | М-16 | 12—14 | 25 | 150—200 | 0,5—1,5 | 0,9 ± 0,3 | 0,25 | 0,20 |
| | М-22 | 11—14 | 25 | 150—200 | 1—4 | 1,2 ± 0,3 | 0,20 | 0,20 |
| | М-24 | 20 | 15 | 175—200 | 0,1—0,3 | 0,5 ± 0,2 | 0,25 | 0,75 |
| | МГ | 20 | 20 | 180—230 | 0,05—0,15 | 0,2 ± 0,1 | 0,20 | 0,80 |
| | МГ-2 | 20 | 20 | 180—230 | 0,05—0,35 | 0,5 ± 0,2 | 0,20 | 0,40 |
| | МГ-6 | 18 | 20 | 200—250 | 0,3—1,3 | 1,0 + 0,4 | 0,20 | 0,50 |
| Бронзо-графитные | БГ-6 | 20 | 20 | 170—220 | 0,5—0,9 | 0,3 ± 0,1 | 0,25 | 0,25 |



*Таблица 2*

**Номинальные размеры щеток**

| $b_щ$ (в *мм*) | $l_щ$ (в *мм*) | $b_щ \times l_щ$ (в *мм²*) | Высота $h$ (в *мм*): 12 | 15 | 20 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 16 | 12 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 5 | 20 | 12 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 5 | 5 | 25 | 12 | 15 | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 6,5 | 32,5 | 12 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 8 | 40 | 12 | 15 | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 12 | 60 | 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 100 | — | — | 20 | — | 32 | — | — | — | — | — |
| 6,5 | 6,5 | 42,25 | — | 15 | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 8 | 52 | 12 | 15 | 20 | 25 | — | 35 | — | — | — | — |
| | 10 | 65 | — | — | 20 | 25 | — | — | — | — | — | — |
| | 12,5 | 81,25 | — | — | 20 | 25 | — | — | — | — | — | — |
| | 15 | 97,5 | — | — | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| 7 | 12,5 | 87,5 | — | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 14 | 98 | 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8 | 8 | 84 | — | — | 20 | — | 32 | — | — | — | — | — |
| | 10 | 80 | — | 15 | 20 | 25 | — | 35 | — | — | — | — |
| | 12,5 | 100 | — | — | 20 | 25 | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 15 | 120 | — | — | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 16 | 128 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | — | — | — | — |
| | 20 | 160 | — | — | 20 | 25 | — | 35 | 40 | — | — | — |
| | 25 | 200 | — | — | 20 | 25 | — | 35 | — | 50 | — | — |
| 9,2 | 20 | 184 | — | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |
| 10 | 10 | 100 | — | 15 | 20 | 25 | — | 35 | 40 | — | — | — |
| | 12,5 | 125 | — | — | 20 | 25 | 32 | — | 40 | — | — | — |
| | 16 | 160 | — | 15 | 20 | 25 | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 18 | 180 | — | — | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 200 | — | — | 20 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | — | — |
| | 25 | 250 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | — | 50 | — | — |
| | 32 | 320 | — | — | — | 25 | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 60 | 600 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | — | — |
| 12 | 32 | 384 | — | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |

| $b_щ$ (в мм) | $l_щ$ (в мм) | $b_щ \times l_щ$ (в мм²) | Высота $h$ (в мм) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 12 | 15 | 20 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| 4 | 4 | 16 | 12 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 5 | 20 | 12 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 5 | 5 | 25 | 12 | 15 | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 6,5 | 32,5 | 12 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 8 | 40 | 12 | 15 | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 12 | 60 | 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 100 | — | — | 20 | — | 32 | — | — | — | — | — |
| 6,5 | 6,5 | 45,25 | — | 15 | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 8 | 52 | 12 | 15 | 20 | 25 | — | 35 | — | — | — | — |
| | 10 | 65 | — | — | 20 | 25 | — | — | — | — | — | — |
| | 12,5 | 81,25 | — | — | 20 | 25 | — | — | — | — | — | — |
| | 15 | 97,5 | — | — | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| 7 | 12,5 | 87,5 | — | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 14 | 98 | 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 8 | 8 | 84 | — | — | 20 | — | 32 | — | — | — | — | — |
| | 10 | 80 | — | 15 | 20 | 25 | — | 35 | — | — | — | — |
| | 12,5 | 100 | — | — | 20 | 25 | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 15 | 120 | — | — | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 16 | 128 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | — | — | — | — |
| | 20 | 160 | — | — | 20 | 25 | — | 35 | 40 | — | — | — |
| | 25 | 200 | — | — | 20 | 25 | — | 35 | — | 50 | — | — |
| 9,2 | 20 | 184 | — | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |
| 10 | 10 | 100 | — | 15 | 20 | 25 | — | 35 | 40 | — | — | — |
| | 12,5 | 125 | — | — | 20 | 25 | 32 | — | 40 | — | — | — |
| | 16 | 160 | — | 15 | 20 | 25 | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 18 | 180 | — | — | 20 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 200 | — | — | 20 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | — | — |
| | 25 | 250 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | — | 50 | — | — |
| | 32 | 320 | — | — | — | 25 | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 60 | 600 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | — | — |
| 12 | 32 | 384 | — | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |





| $b_щ$ (в мм) | $l_щ$ (в мм) | $b_щ \times l_щ$ (в мм²) | Высота $h$ (в мм) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 12 | 15 | 20 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| 12,5 | 12,5 | 156,25 | — | — | — | — | 32 | — | — | — | — | — |
| | 16 | 200 | — | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 250 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | 40 | — | — | — |
| | 25 | 312,5 | — | — | — | — | — | 35 | 40 | 50 | — | — |
| | 30 | 375 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 400 | — | — | — | 25 | 32 | — | 40 | 50 | 60 | — |
| | 40 | 500 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | — |
| | 50 | 625 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | — |
| 16 | 16 | 256 | — | — | 20 | — | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 20 | 320 | — | — | — | 25 | — | — | — | 50 | — | — |
| | 25 | 400 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | — | — |
| | 30 | 480 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 512 | — | — | — | 25 | 32 | — | 40 | 50 | 60 | 70 |
| | 40 | 640 | — | — | — | — | — | — | 40 | 50 | 60 | — |
| | 50 | 800 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | 60 | 70 |
| | 60 | 960 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | 60 | 70 |
| 20 | 20 | 400 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 25 | 500 | — | — | — | — | 32 | — | 40 | — | 60 | — |
| | 30 | 600 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 6400 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | 60 | 70 |
| | 40 | 800 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | 60 | — |
| | 60 | 1200 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | — | 70 |
| 22 | 30 | 660 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | 60 | — |
| 25 | 25 | 625 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | 60 | — |
| | 30 | 750 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 800 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | 60 | 70 |
| | 40 | 1000 | — | — | — | — | — | — | 40 | — | 60 | — |
| | 50 | 1250 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | 70 |
| 30 | 30 | 900 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| 32 | 32 | 1024 | — | — | — | 25 | 32 | — | — | — | 60 | — |
| | 40 | 1280 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | — |
| 35 | 35 | 1225 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | — | — |

| $b_{щ}$ (в *мм*) | $l_{щ}$ (в *мм*) | $b_{щ} \times l_{щ}$ (в *мм*²) | Высота *h* (в *мм*) 12 | 15 | 20 | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12,5 | 12,5 | 156,25 | — | — | — | — | 32 | — | — | — | — | — |
| | 16 | 200 | — | — | — | 25 | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 250 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | 40 | — | — | — |
| | 25 | 312,5 | — | — | — | — | — | 35 | 40 | 50 | — | — |
| | 30 | 375 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 400 | — | — | — | 25 | 32 | — | 40 | 50 | 60 | — |
| | 40 | 500 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | — |
| | 50 | 625 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | — |
| 16 | 16 | 256 | — | — | 20 | — | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 20 | 320 | — | — | — | 25 | — | — | — | 50 | — | — |
| | 25 | 400 | — | — | — | 25 | 32 | 35 | 40 | 50 | — | — |
| | 30 | 480 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 512 | — | — | — | 25 | 32 | — | 40 | 50 | 60 | 70 |
| | 40 | 640 | — | — | — | — | — | — | 40 | 50 | 60 | — |
| | 50 | 800 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | 60 | 70 |
| | 60 | 960 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | 60 | 70 |
| 20 | 20 | 400 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | — | — |
| | 25 | 500 | — | — | — | — | 32 | — | 40 | — | 60 | — |
| | 30 | 600 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 6400 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | 60 | 70 |
| | 40 | 800 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | 60 | — |
| | 60 | 1200 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | — | 70 |
| 22 | 30 | 660 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | 60 | — |
| 25 | 25 | 625 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | 60 | — |
| | 30 | 750 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | — |
| | 32 | 800 | — | — | — | — | 32 | — | — | 50 | 60 | 70 |
| | 40 | 1000 | — | — | — | — | — | — | 40 | — | 60 | — |
| | 50 | 1250 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | 70 |
| 30 | 30 | 900 | — | — | — | — | — | 35 | — | — | — | |
| 32 | 32 | 1024 | — | — | — | 25 | 32 | — | — | — | 60 | — |
| | 40 | 1280 | — | — | — | — | — | — | — | — | 60 | — |
| 35 | 35 | 1225 | — | — | — | — | — | — | — | 50 | — | — |





## БАКИ И РАДИАТОРЫ

Для увеличения охлаждающей поверхности бака применяются нормал[illegible]ванные двухрядные трубчатые охладители (табл. 1). В каждом ряду по 16 труб диаметром 51 *мм* с толщиной стенки труб 1,8 *мм*.

*Таблица 1*

**Данные охладителей**

| Вертикальное расстояние между центрами патрубков (в *мм*) | Одинарный охладитель: поверхность охлаждения (в *м*²) | вес охладителя (в *кг*) | вес масла в охладителе (в *кг*) | Сдвоенный охладитель: поверхность охлаждения (в *м*²) | вес охладителя (в *кг*) | вес масла в охладителе (в *кг*) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1880 | 11,6 | 208 | 163 | 23,2 | 374 | 277 |
| 2000 | 12,3 | 217 | 168 | 24,2 | 391 | 290 |
| 2285 | 13,7 | 237 | 189 | 27,4 | 431 | 317 |
| 2485 | 14,8 | 251 | 192 | 29,6 | 459 | 337 |
| 2685 | 15,8 | 265 | 203 | 31,6 | 487 | 357 |
| 3000 | — | — | — | 34,8 | 535 | 390 |
| 3250 | 18,7 | 304 | 230 | 37,4 | 570 | 416 |
| 3750 | 21,2 | 339 | 255 | 42,4 | 640 | 464 |
| 4000 | — | — | — | 45 | 674 | 490 |
| 4250 | 23,8 | 374 | 280 | 47,6 | 710 | 516 |

Охладитель присоединяется к стенке бака при помощи патрубка, выполненного трубой с условным проходом 80 *мм* и длиной 70 *мм*.

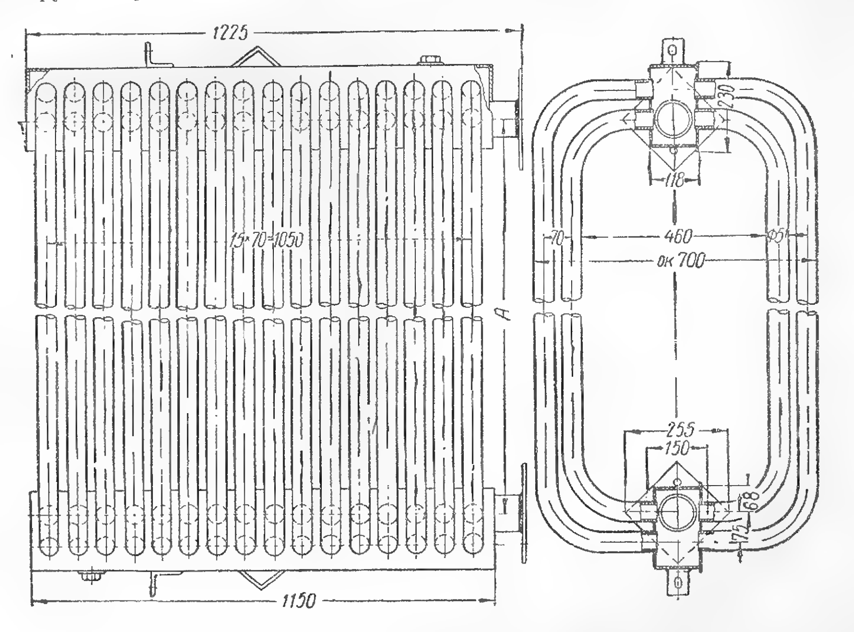



Рис. 1.

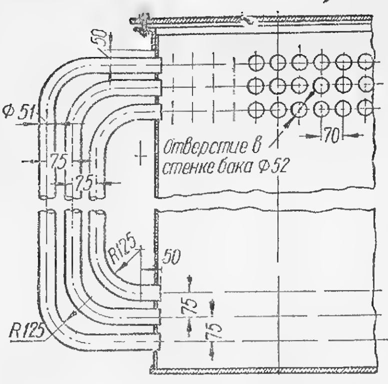


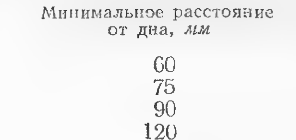

Рис. 2

При размещении патрубков для охладителей надо соблюдать минимальные расстояния от верхней рамы и от дна бака, расстояние от которого должно быть не менее 175 *мм*. Расстояние от верхней рамы зависит от конструкции.

При рамах из угольников с полкой 75 *мм* расстояние от оси патрубка до рамы должно быть не менее 170 *мм*, а при полке угольника 100 *мм* — не менее 200 *мм*. В случае плоской рамы расстояние будет порядка 170 *мм*.

Размещение охладителей по периметру бака может быть либо касательное (одинарные охладители), либо радиальное (сдвоенные). Иногда применяют смешанную установку. Минимальные расстояния между охладителями указаны на рис. 1.

В трансформаторах 2-го и 3-го габаритов применяются трубчатые баки. Трубы 51 × 1,8 *мм* ввариваются непосредственно в стенки бака (рис. 2). Минимальное расстояние от дна до оси нижнего ряда труб выбирается в зависимости от длины прямого участка нижнего ряда труб.



| Длина прямого участка, *мм* | Минимальное расстояние от дна, *мм* |
|---|---|
| 50 | 60 |
| 100, 125 | 75 |
| 175, 200 | 90 |
| 250, 275 | 120 |

*Приложение IX*

## НОРМАЛЬНЫЕ ХВОСТЫ ПОЛЮСОВ

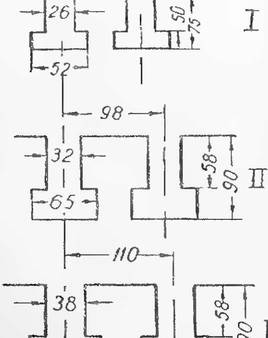



Рис. 1.

| № хвостов | Толщина листов (в *мм*) | Предел пропорциональности в (*кг/см*) | | Допустимая нагрузка на 1 *см* длины полюса (в *кг*) при угонной скорости | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Не проварено | Проварено | Не проварено | Проварено |
| I | 1 | 560 | 845 | 710 | 1070 |
| | 1,5 | 1920 | 2640 | 2420 | 3350 |
| II | 1 | 490 | 1050 | 625 | 1330 |
| | 1,5 | 1820 | 2120 | 2320 | 2640 |
| III | 1,0 | 420 | 1400 | 535 | 1780 |
| | 1,5 | 2640 | 2980 | 3340 | 3760 |



*Приложение X*

## ХАРАКТЕРИСТИКА МОМЕНТА НА ВАЛУ ТИПИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО [1]

| Тип машины | Пределы изменения вращающего момента | Кратность максимального момента | |
|---|---|---|---|
| | | $k$ | $k_п$ |
| Зарядные агрегаты, генераторы для электрохимических процессов | $M = M_N = \text{const}$ | 1 | 0 |
| Нормальные электромашины мощностью от 1,0 до 100 *квт* | $+M_{max} \div 0$ | 1 | 1 |
| Прокатные реверсивные двигатели | $+M_{max} \div -M_{max}$ | 0 | 3,5 |
| Генераторы для питания реверсивных приводов | $+M_{max} \div 0$ | 1,5 | 1,5 |
| Двигатели поршневых компрессоров | $+M_{max} \div 0$ | 2 | 2 |
| Генераторы дизельных агрегатов | $kM_N + k_пM_N$ | 1,25 | 2,5 |
| Тяговые электродвигатели | $M_{max} \div 0$ | 1,5 | 1,5 |

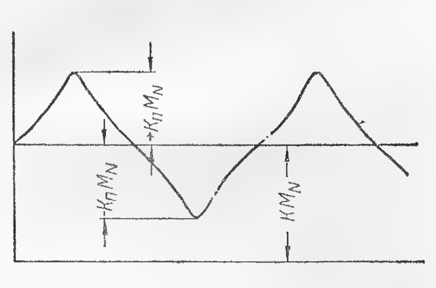



Рис. 1.

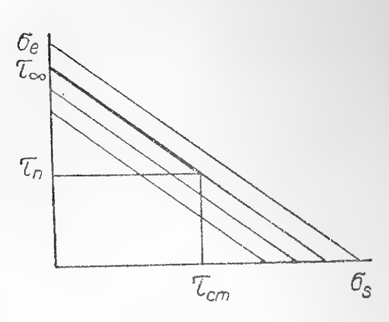



Рис. 2.

На рис. 1 дано общее выражение момента на валу

$$M = kM_N \pm k_пM_N.$$



На рис. 2 приведено определение эквивалентного знакопеременного напряжения: $\sigma_e$ — предел усталости, равный предельно возможному по прочности знакопеременному напряжению; $\sigma_s$ — предел текучести; $\tau_{ст} = \frac{kM_N}{W_{кр}}$ — статическое напряжение; $\tau_п = \frac{k_пM_N}{W_{кр}}$ — знакопеременное напряжение ($W_{кр}$ — момент сопротивления кручению).

*Приложение XI*

## РАЗМЕРЫ КОНЦОВ ВАЛА, ШПОНОК И ШПОНОЧНЫХ КАНАВОК

| Конец вала | | Шпонка | | | | Скорость (в об/мин) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 1500 | 1000 | 750 | 600 |
| d (в мм) | l (в мм) | b (в мм) | h (в мм) | s (в мм) | t (в мм) | Мощность (в квт) | | | |
| 10 | 23 | 3 | 3 | 0,2 | d — 2 | 0,045 ÷ 0,125 | | | |
| 12 | 30 | 4 | 4 | 0,2 | d — 2,5 | 0,063 ÷ 0,200 | | | |
| 14 | 30 | 4 | 4 | 0,2 | d — 2,5 | 0,125 ÷ 0,355 | | | |
| 16 | 40 | 5 | 5 | 0,2 | d — 3 | 0,20 ÷ 0,63 | 0,080 ÷ 0,355 | | |
| 19 | 50 | 6 | 5 | 0,2 | d — 3 | 0,45 ÷ 1,40 | 0,28 ÷ 0,90 | | |
| 24 | 60 | 6 | 5 | 0,2 | d — 3 | 1,00 ÷ 3,15 | 0,50 ÷ 2,00 | | |
| 28 | 60 | 8 | 6 | 0,2 | d — 3,5 | 1,60 ÷ 4,50 | 1,12 ÷ 3,15 | | |
| 32 | 80 | 10 | 7 | 0,2 | d — 4 | 3,55 ÷ 7,10 | 2,24 ÷ 5,00 | 1,12 ÷ 3,15 | |
| 35 | 80 | 10 | 7 | 0,2 | d — 4 | 4,5 ÷ 9,0 | 3,15 ÷ 6,30 | 1,6 ÷ 4,5 | |
| 40 | 110 | 12 | 8 | 0,2 | d — 4,5 | 7,1 ÷ 14,0 | 5,0 ÷ 10,00 | 2,5 ÷ 7,1 | |
| 45 | 110 | 14 | 9 | 0,2 | d — 5 | 10,0 ÷ 20,0 | 7,1 ÷ 14,0 | 5,0 ÷ 10,0 | |
| 50 | 110 | 16 | 10 | 0,2 | d — 5 | 16,0 ÷ 31,5 | 10,0 ÷ 20,0 | 8,0 ÷ 16,0 | 6,3 ÷ 12,5 |
| 55 | 110 | 16 | 10 | 0,2 | d — 5 | 20,0 ÷ 40,0 | 14,0 ÷ 28,0 | 10,0 ÷ 20,0 | 8,0 ÷ 16,0 |
| 60 | 140 | 18 | 11 | 0,3 | d — 5,5 | 25,0 ÷ 50,0 | 18,0 ÷ 35,5 | 12,5 ÷ 25,0 | 10,0 ÷ 20,0 |
| 65 | 140 | 18 | 11 | 0,3 | d — 5,5 | 35,5 ÷ 71,0 | 25,0 ÷ 45,0 | 18,0 ÷ 35,5 | 14,0 ÷ 28,0 |
| 70 | 140 | 20 | 12 | 0,3 | d — 6 | 45 ÷ 90 | 23,6 ÷ 56,0 | 20,0 ÷ 40,0 | 18,0 ÷ 35,5 |
| 75 | 140 | 20 | 12 | 0,3 | d — 6 | 56 ÷ 112 | 35,5 ÷ 71,0 | 28,0 ÷ 56,0 | 22,4 ÷ 45,0 |
| 80 | 170 | 24 | 14 | 0,3 | d — 7 | 75 ÷ 150 | 50 ÷ 100 | 35,5 ÷ 71,0 | 31,5 ÷ 63,0 |
| 85 | 170 | 24 | 14 | 0,3 | d — 7 | 112 ÷ 224 | 75 ÷ 150 | 56 ÷ 118 | 45 ÷ 90 |
| 90 | 170 | 24 | 14 | 0,3 | d — 7 | 200 ÷ 400 | 132 ÷ 265 | 100 ÷ 200 | 80 ÷ 160 |
| 100 | 210 | 28 | 16 | 0,3 | d — 8 | 250 ÷ 600 | 200 ÷ 400 | 150 ÷ 300 | 118 ÷ 236 |
| 110 | 210 | 32 | 18 | 0,3 | d — 9 | 375 ÷ 950 | 250 ÷ 630 | 190 ÷ 475 | 150 ÷ 375 |
| 120 | 210 | 32 | 18 | 0,3 | d — 9 | — | 500 ÷ 1000 | 375 ÷ 750 | 300 ÷ 600 |

*Приложение XII*

## ВЫБОР ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Подшипники качения (шарикоподшипники, см. рис. 1, и роликоподшипники) отличаются от подшипников скользящего трения следующими особенностями: а) первые обычно выполняются так, что наряду с радиальной нагрузкой воспринимают также значительную аксиальную нагрузку; б) допустимая нагрузка на подшипник катящего трения резко падает при повышении скорости вращения.

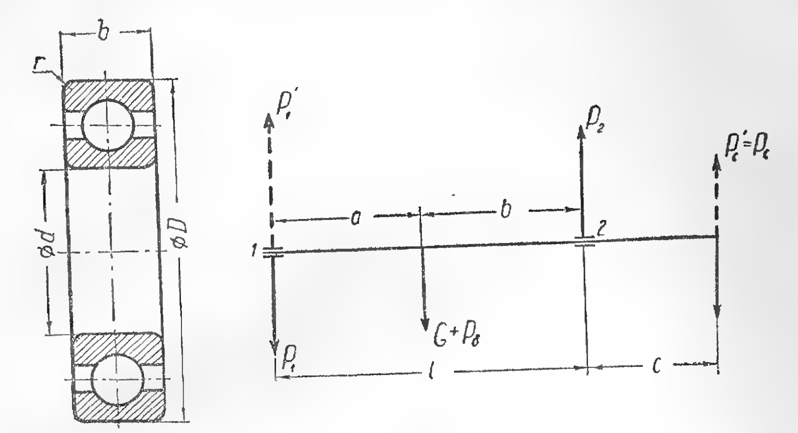



Рис. 1.

Подшипники качения нашли широкое применение в ответственных мощных машинах (до 500 *квт* и выше) и, в частности, в тяговом электромашиностроении.

Выбор подшипников. Определяются величины реакций $P_1'$ и $P_2$ для наиболее тяжелого случая. Это соответствует направлению силы $P_c$ вниз для $P_2$ и вверх для $P_1'$.

Поэтому

$$P_2 = P_c \frac{l+c}{l} + (G + P_\delta)\frac{a}{l},$$

$$P_1' = P_c \frac{c}{l} + (G + P_\delta)\frac{b}{l}.$$

Определение $P_c$ и $P_\delta$ см. § 8-7 стр. 281 и 300.

Определяются коэффициенты работоспособности $C$ подшипников *1* и *2*:

а) для подшипника 2 (левая опора, рис. 1)

$$C \geqslant P_2 K_\delta (nh)^{0,3};$$

б) для подшипника *1* (правая опора)

$$C \geqslant (P_1' + mA) K_\delta (nh)^{0,3},$$

где $n$ — число об/мин, $h$ — гарантийный срок работы подшипника, принимаемый обычно в 10 000 час., $K_\delta$ и $m$ — из табл. 1 и 2, $A$ — осевое усилие (в *кг*); для вертикальных машин — вес вращающейся части и осевая реакция привода,

а для горизонтальных машин — 0,15 веса ротора (если осевые усилия точно не подсчитываются);

в) для роликоподшипника *1* с короткими цилиндрическими роликами в формулу для *C* осевое усилие *A* не вводится, но аксиальные усилия не должны превышать:

0,0016 *C* (в *кг*) — при постоянной осевой нагрузке,
0,0022 *C* (в *кг*) — при осевой нагрузке непостоянной, но часто действующей,
0,0043 *C* (в *кг*) — при редко действующей осевой нагрузке.

После определения *C* по таблицам, приводимым ниже, может быть подобран подшипник.

*Таблица 1*

**Примерные значения коэффициента $K_\delta$**

| Характер нагрузки на подшипник | $K_\delta$ |
|---|---|
| Постоянная спокойная нагрузка | 1 |
| Нагрузка со слабыми толчками | 1,5 |
| Нагрузка со значительными толчками или вибрацией | 2 |
| Ударная нагрузка с сильными и частыми толчками | 3 |

Примечание. При ременной передаче давление на валу в месте посадки шкива от натяжения ремня принимается равным пятикратной величине окружного усилия.

При зубчатых передачах давление на валу в месте посадки зубчатых колес принимается равным от полуторной до трехкратной величины окружного усилия в зависимости от обработки зубьев.

Для шлифованных зубьев в масляной ванне давление на валу составляет 1,5 окружного усилия, для фрезерованных зубьев — в масляной ванне — 2, для литых зубьев, грубо обработанных, — 3.

*Таблица 2*

**Значение коэффициента *m***

| Наименование подшипников | *m* |
|---|---|
| Шарикоподшипники радиальные однорядные всех серий | 1,5 |
| Шарикоподшипники радиальные сферические легкой серии диаметром до 40 *мм* | 3,5 |
| Шарикоподшипники радиальные сферические легкой серии диаметром 45 *мм* и выше | 5 |
| Шарикоподшипники радиальные сферические средней серии | 4 |
| Шарикоподшипники радиальные сферические средней серии на закрепительных втулках | 4 |
| Шарикоподшипники радиальные сферические средней широкой серии | 3 |
| Роликоподшипники радиальные, сферические двухрядные | 3 |



*Таблица 3*

**Шарикоподшипники радиальные однорядные**

Средняя серия

| Условное обозначение подшипника | *d* (в *мм*) | *D* (в *мм*) | *b* (в *мм*) | *r* (в *мм*) | Коэффициент работоспособности, *C* | Предельная скорость (в об/мин) | Вес (в *кг*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 301 | 12 | 37 | 12 | 1,5 | 9400 | 10 000 | 0,058 |
| 302 | 15 | 42 | 13 | 1,5 | 11 500 | 10 000 | 0,075 |
| 303 | 17 | 47 | 14 | 1,5 | 13 800 | 10 000 | 0,100 |
| 304 | 20 | 50 | 15 | 2,0 | 15 500 | 10 000 | 0,140 |
| 305 | 25 | 62 | 17 | 2,0 | 20 900 | 10 060 | 0,245 |
| 306 | 30 | 72 | 19 | 2,0 | 27 700 | 5000 | 0,340 |
| 307 | 35 | 80 | 21 | 2,5 | 32 300 | 5000 | 0,464 |
| 308 | 40 | 90 | 23 | 2,5 | 39 200 | 5000 | 0,645 |
| 309 | 45 | 100 | 25 | 2,5 | 48 100 | 3500 | 0,850 |
| 310 | 50 | 110 | 27 | 3,0 | 57 000 | 3500 | 1,12 |
| 311 | 55 | 120 | 29 | 3,0 | 64 400 | 2500 | 1,41 |
| 312 | 60 | 130 | 31 | 3,5 | 73 300 | 2500 | 1,78 |
| 313 | 65 | 140 | 33 | 3,5 | 83 000 | 1500 | 2,13 |
| 314 | 70 | 150 | 35 | 3.5 | 93 300 | 1500 | 2,62 |
| 315 | 75 | 160 | 37 | 3,5 | 101 000 | 1500 | 3,18 |
| 316 | 80 | 170 | 39 | 3,5 | 113 000 | 1500 | 3,73 |
| 317 | 85 | 180 | 41 | 4,0 | 125 000 | 1500 | 4,59 |
| 318 | 90 | 190 | 43 | 4,0 | 137 000 | 1500 | 5.30 |
| 319 | 95 | 200 | 45 | 4,0 | 150 000 | 1500 | 6,07 |
| 320 | 100 | 215 | 47 | 4,0 | 165 000 | 1000 | 7,68 |

*Таблица 4*

**Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами**

| Условное обозначение внутреннего диаметра | $d$ (в *мм*) | $D$ (в *мм*) | $b$ (в *мм*) | $b_1$ (в *мм*) | $r=r_2$ (в *мм*) | Коэффициент работоспособности, $C$ | Предельная скорость (в об/мин) | Вес (в *кг*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Средняя серия** | | | | | | | | |
| 08 | 40 | 90 | 23 | 7 | 2,5 | 50 000 | 5000 | 0,75 |
| 09 | 45 | 100 | 25 | 7 | 2,5 | 65 000 | 5000 | 0,95 |
| 10 | 50 | 110 | 27 | 8 | 3,0 | 80 000 | 5000 | 1,3 |
| 11 | 55 | 120 | 29 | 9 | 3,0 | 100 000 | 5000 | 1,7 |
| 12 | 60 | 130 | 31 | 9 | 3,5 | 115 000 | 3500 | 2,1 |
| 13 | 65 | 140 | 33 | 10 | 3,5 | 130 000 | 3500 | 2,5 |
| 14 | 70 | 150 | 35 | 10 | 3,5 | 145 000 | 2500 | 3,1 |
| 15 | 75 | 160 | 37 | 11 | 3,5 | 170 000 | 2500 | 3,7 |
| 16 | 80 | 170 | 39 | 11 | 3,5 | 180 000 | 2500 | 4,4 |
| 17 | 85 | 180 | 41 | 12 | 4,0 | 215 000 | 2500 | 5,2 |
| 18 | 90 | 190 | 43 | 12 | 4,0 | 230 000 | 1500 | 6,1 |
| 19 | 95 | 200 | 45 | 13 | 4,0 | 240 000 | 1500 | 7,1 |
| 20 | 100 | 215 | 47 | 13 | 4,0 | 290 000 | 1500 | 8,8 |
| **Средняя широкая серия** | | | | | | | | |
| 14 | 70 | 150 | 51 | 10 | 3,5 | 190 000 | 1500 | 4,5 |
| 15 | 75 | 160 | 55 | 11 | 3,5 | 230 000 | 1500 | 5,5 |
| 16 | 80 | 170 | 58 | 11 | 3,5 | 240 000 | 1500 | 6,5 |
| 17 | 85 | 180 | 60 | 12 | 4,0 | 290 000 | 1500 | 7,5 |
| 18 | 90 | 190 | 64 | 12 | 4,0 | 310 000 | 1000 | 9,5 |
| 19 | 95 | 200 | 67 | 13 | 4,0 | 350 000 | 1000 | 10,5 |
| 20 | 100 | 215 | 73 | 13 | 4,0 | 400 000 | 1000 | 14 |
| 22 | 110 | 240 | 80 | 14 | 4,0 | 510 000 | 1000 | 19 |
| 24 | 120 | 260 | 86 | 14 | 4,0 | 620 000 | 1000 | 24 |
| 26 | 130 | 280 | 93 | 14 | 5,0 | 730 000 | 1000 | 30 |



## ЛИТЕРАТУРА


1. Алексеев А., Конструкция электрических машин, ГЭИ, 1949 и ГЭИ, 1958.
2. Алексеев А. и Костенко М., Турбогенераторы, ГЭИ, 1939.
3. Алексеев А., Ефремов Д., Лютер Р., Гидрогенераторы Днепрогэса, изготовления завода «Электросила», Электричество, 1938, № 4.
4. Алексеев А., Тяговые электродвигатели, ГЭИ, 1938, 1951.
5. Арнольд Э. и Ла-Кур И., Машины постоянного тока, т. 1 и 2, ГНТИ, 1931.
6. Апаров Б., Асинхронные машины, ОНТИ, 1936.
7. Апаров Б., Рабочий процесс асинхронного двигателя с учетом насыщения, ВЭП, 1940, № 7.
8. Абе Р. и Еремеев А., Обзор развития гидрогенераторостроения на заводе «Электросила» им. Кирова, ВЭП, 1937, № 11.
9. Балашов К., Вариантный метод расчета трансформаторов, ВЭП, № 8, 1958.
10. Бергер А., Синхронные машины, ГОНТИ, 1938.
11. Бергер А. и Пантелеев, Расчет и конструкция машин переменного тока, ГОНТИ, 1931.
12. Бергер А., Турбогенераторы, т. I и II, ОНТИ, 1931, т. III, ГЭИ, 1941.
13. Бертинов А. и Резник Г., Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока, Оборонгиз, 1958.
14. Беляев Н., Сопротивление материалов, ГТИ, 1949.
15. Булгаков Н., Расчет трансформаторов, ГЭИ, 1950.
16. Берковский А., Турбогенераторы с внутренним охлаждением активных частей (Обзор зарубежной техники), Электричество, № 6, 1955.
17. Берковский А., Жидкостное охлаждение турбогенераторов (Обзор зарубежной техники), Электричество, № 10, 1957.
18. Борисенко А. и Янтовский Е., Тепловое сопротивление воздушного зазора электрической машины, ВЭП, № 3, 1957.
19. Видмар М., Трансформаторы, ГОНТИ, 1931.
20. Видмар М., Экономические законы проектирования электрических машин, ГОНТИ, 1930.
21. Виноградов Н., Технология производства электрических машин, ГЭИ, 1940.
22. Вольпин, Гемке, Еремеев А. и др., Обмотки электрических машин, ГЭИ, 1940.
23. Вольдек А., Дифференциальное рассеяние обмотки статора явнополюсной синхронной машины, Электричество, № 8, 1953.
24. Вульман Г. (ред.), Современные синхронные генераторы, Вып. 1, Сб. «Энергетика за рубежом», ГЭИ, 1957.
25. Гланц Ф., Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока, Сб. «Электросила», 1947, № 4.

26. Гольденберг С. и Шур Г., Вопросы конструирования демпферных обмоток гидрогенераторов, ВЭП, № 10, 1958.
27. Дементьев Ф., Турбогенераторы (Технический справочник), ГЭИ, 1933.
28. Данчик З., Вопросы проектирования возбудителей синхронных машин, ВЭП, 1935, № 12.
29. Еремеев А. и Соломин Н., Гидрогенераторы (Технический справочник), ГЭИ, 1935.
30. Ефремов Д., К вопросу о выборе изоляции 6000-вольтных обмоток машин средней мощности, Сб. «За единые серии электрических машин». Вып. I, 1935.
31. Ермолин Н., Расчет маломощных коллекторных машин, ГЭИ, 1955.
32. Еремеев А. и Федоров В., Гидрогенераторы для Угличской и Шекснинской гидростанции, ВЭП, 1940, № 1.
33. Еремеев А., Определение махового момента синхронных двигателей.
34. Еремеев А., Гидрогенераторы большой мощности, ВЭП, № 4, 1955.
35. Ефремов Д. и Лютер Р., Проблемы изоляции для электрических машин, Труды третьей Всесоюзной конференции по изоляционным материалам, 1934.
36. Завалишин Д., Машины постоянного тока, ОНТИ, 1938.
37. Зимин В. и др., Обмотки электрических машин, ГЭИ, 1954.
38. Иванов В., Синхронные машины, Кубуч, 1934.
39. Иванов Н., Клейман Н., Самойлович Н., Короткозамкнутые асинхронные двигатели с одной клеткой из стержней специального профиля, ВЭП, 1953, № 5.
40. Иванов Н., Развитие турбогенераторостроения, ВЭП, 1956, № 2.
41. Иванов Н., Вопросы проектирования турбогенераторов форсированным охлаждением, Электричество, № 11, 1957.
42. Иванов Н., Новый приближенный метод расчета подпятников, ВЭП, № 6, 1958.
43. Иоффе А., О силе одностороннего магнитного притяжения в электрических машинах, ВЭП, 1950, № 3.
44. Иоффе А., О некоторых вопросах расчета бандажей электрических машин, ВЭП, 1957, № 8.
45. Ипатов П., Практический способ составления схем трехфазных волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, ВЭП, 1952, № 9.
46. Ипатов Н., Зубцовые гармонические в кривой э.д.с. синхронного генератора, ВЭП, 1953, № 7.
47. Ипатов П., Влияние демпферной обмотки на э.д.с. синхронного генератора, Электричество, 1957, № 3.
48. Ипатов П., Составление схем многоскоростных обмоток асинхронных двигателей, ВЭП, 1955, № 1.
49. Комар Е. и Брицын М., Турбогенераторы серии Т-2, Лениздат, 1945.
50. Комар Е., Вопросы эксплуатации турбогенераторов, ГЭИ, 1950.
51. Комар Е., Вопросы проектирования турбогенераторов, ГЭИ, 1955.
52. Костин К., Гидрогенераторы для Камской ГЭС, ВЭП, 1956, № 11.
53. Костенко М., Электрические машины, Общая часть, ГЭИ, 1944, Специальная часть, ГЭИ, 1949.
54. Костенко М., Асинхронные двигатели с осевой и радиальной системой вентиляции, Сб. «За единые серии», 1936, № 2.
55. Костенко М., Расчет асинхронных двигателей в относительных единицах, Сб. «За единые серии», 1937, № 3.
56. Кузнецов Б., Самойлович Н., Певзнер О., Формулы поверочного расчета асинхронных двигателей, завод «Электросила», 1938.
57. Кузнецов Б., О влиянии толщины изоляции на степень использования электрических машин, ВЭП, 1956, № 4.
58. Кузнецов Б., Новая серия асинхронных двигателей, ВЭП, 1948, № 9.
59. Курочкин М., Определение минимального диаметра якоря электродвигателей постоянного тока с движущим моментом более 10 *тм.*, ВЭП, 1955, № 6.
60. Калитвянский В., Изоляция электрических машин, ГЭИ, 1949.
61. Калитвянский В., Изоляция в новых сериях электрических машин, ВЭП, 1948, № 9.



62. Касьянов В., Машины постоянного тока предельной и большой мощности и особенности их расчета, ВЭП, 1939, № 5.
63. Касьянов В., Составление схем петлевых и волновых обмоток трехфазного тока, Сб. «Электросила», 1949, № 6.
64. Касьянов В., О свойствах, применении и проектировании простейших и сложных лягушечьих обмоток, Сб. «Электросила», 1947, № 4.
65. Касьянов В., Расчет явнополюсных синхронных машин, Ленинград, 1951.
66. Касьянов В., Расчет машин постоянного тока, Ленинград, 1950
67. Карман Г. и Био М., Математические методы в инженерном деле, ОГИЗ, 1946.
68. Красовский Б., Вопросы прочности электрических машин, АН СССР, 1951.
69. Красовский Б., Выбор конструкции коллектора электрических машин, ВЭП, № 1, 1958.
70. Крайз А. (ред.), Трансформаторы, Вып. 1, Сб. «Энергетика за рубежом», ГЭИ, 1958.
71. Лившиц М., Электрические машины, т. III, ОНТИ, 1936.
72. Лившиц М. и Глекнер Г., Электрические машины, т. II, ОНТИ, 1935.
73. Лютер Р., Обмотки современных гидрогенераторов, ВЭП, 1935, № 9.
74. Московский М., Технология электромашиностроения, ГЭИ, 1947.
75. Мажуга В. Критические скорости ротора турбогенератора, «Теоретическая и экспериментальная электротехника», 1932, № 3.
76. Нейман Л., Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, ГЭИ, 1949.
77. Нейман З., Костин К., Новая серия вертикальных гидрогенераторов для сельского хозяйства, ВЭП, 1955, № 1.
78. Одинг И., Допустимые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов, Машгиз, 1947.
79. Пиотровский Л., Электрические машины, ГЭИ, 1949.
80. Поликовский В., Альпер Т., Земляной М. и Сергиевская Т., Новая схема охлаждения гидрогенераторов, ВЭП, № 4, 1958.
81. Поликовский В. и др., Некоторые вопросы аэродинамики систем охлаждения крупных гидрогенераторов, ВЭП, 1956, № 1.
82. Поликовский В., Вентиляторы, воздуходувки и компрессоры, ГЭИ, 1933.
83. Постников И., О расчете электродинамических сил в обмотках трансформаторов, Электричество, 1957, № 8.
84. Постников И., Методы проектирования однофазных конденсаторных двигателей, Сборник трудов Института электротехники АН УССР. Вып. 14.
85. Постников И., Выбор оптимальных размеров в электрических машинах, ГЭИ, 1951.
86. Постников И., Метод теплового расчета крупных синхронных машин, Труды ЛПИ, № 1, 1946.
87. Постников И., Вихревые токи в синхронных и асинхронных машинах с массивным ротором, Электричество, № 10, 1958.
88. Постников И., Павлов В., Берток Ф., Методы расчета параметров, поверхностных потерь и нагрева синхронных и асинхронных машин с массивным ротором, ВЭП, № 6, 1958.
89. Постников И., Адаменко А., О параметрах схемы замещения и точной круговой диаграммы асинхронной машины, Электричество, 1955, № 12.
90. Постников И., Павлов В., Борушко В., О применении массивных полюсов в крупных гидрогенераторах, ВЭП, 1956, № 11.
91. Постников И., Адаменко А., Особенности проектирования однофазных асинхронных электродвигателей, ВЭП, 1957, № 10.
92. Пунга Ф., Проектирование электрических машин, Кубуч, 1934.
93. Пул Р., Проектирование вентиляторов, ОНТИ, 1934.
94. Приклонский Е., Оптимальная плотность тока в проводах, кабелях и шинах, Электричество, 1950, № 11.
95. Петров Г., Электрические машины, ГЭИ, 1940, ч. II, 1947, ч. II.

96. Петров Г., Трансформаторы, ГЭИ, 1940.
97. Попов В., Основы электропривода, ГЭИ, 1945.
98. Рихтер Р., Электрические машины, тт. 1, 2, 3, 4, ГЭИ.
99. Рихтер Р., Обмотки якорей машин постоянного и переменного тока, ОНТИ, 1933.
100. Сапожников А., Конструирование трансформаторов, ГЭИ, 1952, 1959.
101. Сборник, посвященный памяти заслуженного профессора Павла Петровича Копняева, АН УССР, Институт электротехники — ХПИ, 1955.
102. Сборник заводских расчетов электрических машин постоянного и переменного тока под редакцией Лютера Р., Толвинского В., Кузнецова Б., Иванова Н. и др., Завод «Электросила», 1947—1952.
103. Сборник «Материалы технических совещаний», ЦБТИ, 1957, Достижения в электромашиностроении и аппаратостроении.
104. Сборник ГЭИ, 1957, Новая техника в электроснабжении промышленных предприятий.
105. Сборник «Электросила», № 14, 1956.
106. Сборник статей ЦБТИ НИИ Электропромышленности, 1958, Изоляция электрических машин.
107. Справочник, СЭТ, т. I—VI, Кубуч, 1935.
108. Сергеев П. и др., Проектирование электрических машин, ГЭИ, 1956.
109. Синева Н., Массивный ротор с медным покрытием, Кандидатская диссертация, МЭИ, 1956.
110. Сыромятников И., Надежность работы электрических машин и требования эксплуатации, Электричество, 1944, № 8—9.
111. Сыромятников И., Режимы работы синхронных генераторов, ГЭИ, 1952.
112. Сыромятников И., Режим работы синхронных двигателей, ГЭИ, 1950.
113. Сыромятников И., Допустимые перегрузки генераторов, «Электрические станции», 1940, № 8.
114. Сорокер Т., Дифференциальное рассеяние многофазных асинхронных двигателей, ВЭП, 1956, № 6.
115. Станиславский Л., Серийный турбогенератор 30 тыс. *квт* с водородным охлаждением типа ТВС-30, ВЭП, 1956, № 2.
116. Тареев Б. (ред.) ГЭИ, 1958, Рекомендации для классификации материалов изоляции электрических машин и аппаратов по нагревостойкости.
117. Трапезников В и Зорин, Асинхронные машины со стеклянной изоляцией, Электричество, 1944, № 1.
118. Трапезников В., Обобщение условия соразмерности и оптимальная геометрия трансформаторов, Электричество, 1948, № 2.
119. Трапезников В., О приведенном весе и стоимости в электромашиностроении, Электричество, 1935, № 14.
120. Трапезников В., Оптимальные асинхронные двигатели, Электричество, 1946, № 6.
121. Трапезников В., Обобщенные условия соразмерности трансформаторов и электрических машин, Электричество, 1946, № 2.
122. Трапезников В., Основы проектирования серий асинхронных машин, ГОНТИ, 1937.
123. Толвинский В., Электрические машины постоянного тока, Кубуч, 1929.
124. Толвинский В., Классификация электрических машин, Труды конференции по электромашиностроению, завод «Электросила», 1947.
125. Тимошенко С., Курс сопротивления материалов, Кубуч, 1932.
126. Тимошенко С., Теория колебаний в инженерном деле, ГНТИ, 1932.
127. Тимошенко С., Устойчивость упругих систем, ОГИЗ, 1946.
128. Тихомиров П., Расчет трансформаторов, ГЭИ, 1953.
129. Трамбицкий А., Расчет трансформаторов, ГОНТИ, 1938.
130. Урусов И., Основной вид собственных колебаний статора электрической машины, ВЭП, 1951, № 3.



131. Фридман В., Аналитический метод расчета критических скоростей вращения валов, Сб. «Электросила», № 13, ГЭИ, 1955.
132. Чечет Ю., Управляемый асинхронный двигатель с полым ротором, ГЭИ, 1955, Электрические микромашины автоматических устройств, ГЭИ, 1957.
133. Чиликин М., Общий курс электропривода, ГЭИ, 1951.
134. Шателен М., Русские электротехники, ГЭИ, 1950.
135. Шубов И., Учет упругости пакетов динамной стали при расчете прочности нажимных плит, ВЭП, № 10, 1958.
136. Шубов И., Определение уровня магнитного шума машин постоянного тока методом электромеханической аналогии, Электричество, № 4, 1958.
137. Шубов И., Исследование прочности коллекторов с ласточкиными хвостами, ВЭП, № 7, 1957.
138. Шенфер К., Асинхронные машины, ГЭИ, 1935.
139. Aler, P. The Calculation of the Armature Reactance of Synchronous Machines. T. AIEE, 1928.
140. Brown, A. and Marco, S. Introduction to Heat Transfer, Mc Graw Hill, N. Y. 1942.
141. Cigánek, L. Elektricke Stroje, Praha, 1951.
142. Gibbs Induction and Synchronous Motors with unlaminated rotors. Iourn. of IAEE, 1948, № 46.
143. Iezierski, E., Gogolewski Z. и др. Transformatory, budova i projektowanie Warszawa, 1956.
144. Kluge, H. Rechnerische Ermittelung der Temperatur der Ständer und Läuferwicklung für Asynchronmotoren mit Gehause anliegendem Blechpaket und Wasserkühlung im Ständer, Deutsche Elektrotechnik, № 10, 1958.
145. Linville, T. Starting Performance of Salient Pole Synchronous Motors. T. AIEE, 1930.
146. Liwschitz, M. Differential Leakage, T. AIEE, V., 63, 1944.
147. Liwschitz, M. Differential Leakage of Fractionalslot Winding, T. AIEE, V., 65, 1946.
148. Nürnberg, W. Die Asynchronmaschienen, Berlin, 1952.
149. Roth, Ollendorf, Pohlhausen, Funktionentheory und ihre Anwendung.
150. Rziha, E. und Seidener, I. Starkstromtechnik,1930.
151. Torda, T. Die Wahl von Nutzahlen der Dreiphasigen Käfigläufer—Motoren, E и M. № 7, 1958.
152. Walker, M. Specification and Design of. Dynamo Electric Machinery—1920.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

*Глава четвертая.* **Электрические параметры**



*Глава пятая.* **Потери и к. п. д.**



*Глава шестая.* **Тепловые расчеты в электрических машинах и трансформаторах**



*Глава седьмая.* **Расчет вентиляции**



*Глава восьмая.* **Механические расчеты**



*Раздел II*

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ТРАНСФОРМАТОРОВ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ**

*Глава девятая.* **Трансформаторы**







*Глава десятая.* **Машины постоянного тока**



***Примеры расчетов***



*Глава одиннадцатая.* **Асинхронные машины**



***Примеры расчетов***

*Глава двенадцатая.* **Синхронные машины**

***Общие вопросы проектирования синхронных машин***



***Расчет явнополюсных синхронных машин***



***Расчет синхронных неявнополюсных машин***



***Примеры расчетов***